



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada



L'IMPORTANCE D'ADAPTER LE SECTEUR FORESTIER AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

*T.C. Lemprière, P.Y. Bernier, A.L. Carroll, M.D. Flannigan,
R.P. Gilsenan, D.W. McKenney, E.H. Hogg, J.H. Pedlar et D. Blain*

Rapport d'information NOR-X-416F



Centre de foresterie du Nord

Service canadien des forêts

Canada

Le Centre de foresterie du Nord constitue l'un des cinq établissements du Service canadien des forêts, dont l'administration centrale est à Ottawa (Ontario). Le Centre entreprend la réalisation régionale de projets nationaux.

Le Service canadien des forêts s'intéresse surtout à la recherche en vue d'améliorer l'aménagement forestier afin que tous les Canadiens puissent en profiter aux points de vue économique, social et environnemental.

The Northern Forestry Centre is one of five centres of the Canadian Forest Service, which has its headquarters in Ottawa, Ontario. This centre undertakes the regional delivery of national projects.

The Canadian Forest Service's main objective is research in support of improved forest management for economic, social, and environmental benefits to all Canadians.



L'IMPORTANCE D'ADAPTER LE SECTEUR FORESTIER AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

T.C. Lemprière¹, P.Y. Bernier², A.L. Carroll³, M.D. Flannigan⁴,
R.P. Gilzenan⁵, D.W. McKenney⁴, E.H. Hogg⁶, J.H. Pedlar⁴ et D. Blain⁷

Rapport d'information NOR-X-416F

Service canadien des forêts
Ressources naturelles Canada
2008

¹Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Direction de la politique, de l'économie, des affaires internationales et de l'industrie, a/s FEPA Research Unit, 4621-2424 Main Mall, Vancouver (Colombie-Britannique) V6T 1Z4.

²Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides, C. P. 10380, succ. Sainte-Foy, 1055, rue du P.E.P.S., Québec (Québec) G1V 4C7.

³Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, 506 West Burnside Road, Victoria (Colombie-Britannique) V8Z 1M5.

⁴Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Grands Lacs, C.P. 490, 1219 Queen Street East, Sault Ste. Marie (Ontario) P6A 2E5.

⁵Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Direction de la politique, de l'économie, des affaires internationales et de l'industrie, 580, rue Booth, 7^e étage, Ottawa (Ontario) K1A 0E4.

⁶Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, 5320-122 Street, Edmonton (Alberta) T6H 3S5.

⁷Environnement Canada, Sciences et évaluation des risques, 9^e étage, 200, boul. Sacré-Coeur, Gatineau (Québec) K1A 0H3.

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2008

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

Numéro de catalogue : Fo133-1/416F-PDF
ISBN 978-0-662-04836-7
ISSN 0831-8247

Pour une version électronique de ce rapport, visitez la librairie du Service canadien des forêts à <http://librairie.scf.rncan.gc.ca/>

This publication is also available in English under the title *The importance of forest sector adaptation to climate change*.

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

Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives Canada

L'importance d'adapter le secteur forestier aux changements climatiques
[ressource électronique] / T.C. Lemprière ... [et coll.].

(Rapport d'information; NOR-X-416F)

Pub. aussi en anglais sous le titre : *The importance of forest sector adaptation to climate change*

Également publié en version imprimée.

Comprend des réf. bibliogr.

ISBN 978-0-662-04836-7

N° de cat. : Fo133-1/416F-PDF

1. Climat--Changements--Aspect de l'environnement--Canada.
2. Foresterie--Facteurs climatiques--Canada.
3. Sylviculture--Aspect de l'environnement--Canada.
4. Forêts--Gestion--Canada.
5. Gaz à effet de serre--Réduction--Canada.
- I. Lemprière, T. C. (Tony Christopher)
- II. Centre de foresterie du Nord
- III. Coll. : Rapport d'information (Centre de foresterie du Nord : En ligne); NOR-X-416F.

SD397.6.C3 4614 2008

363.738'740971

C2008-980318-3

Lemprière, T.C.; Bernier, P.Y.; Carroll, A.L.; Flannigan, M.D.; Gilseman, R.P.; McKenney, D.W.; Hogg, E.H.; Pedlar, J.H.; Blain, D. 2008. *L'importance d'adapter le secteur forestier aux changements climatiques*. Ressour. nat. Can., Serv. can. for., Cent. for. Nord, Edmonton (Alberta). Rapp. d'inf. NOR-X-416F.

RÉSUMÉ

Le présent rapport trace un bilan des connaissances acquises en matière de changements climatiques récents dans les forêts du Canada et présente des prévisions de changements au cours du siècle selon les scénarios d'émissions mondiales de gaz à effet de serre élaborés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Même si l'on réduit de façon durable les émissions de gaz à l'échelle mondiale, on prévoit un climat très différent et auquel il sera essentiel de s'adapter. On observe déjà les effets sur les forêts, et ils seront de plus en plus considérables. On s'attend d'ailleurs à ce que la tendance actuelle à la hausse de la superficie brûlée chaque année se poursuive. En raison des changements climatiques, les forêts seront soumises à des périodes de stress d'envergure, ce qui augmentera à court et à moyen terme la probabilité d'invasions de ravageurs. Les invasions de plusieurs ravageurs ont dépassé en envergure toutes les épidémies antérieures et sont associées au franchissement du seuil climatique. L'invasion de la forêt boréale par le dendroctone du pin ponderosa (*Dendroctonus ponderosae* Hopkins) semble probable, même si l'effet de l'élargissement cette aire de répartition serait probablement moindre que celui observé récemment en Colombie-Britannique. On prévoit en outre que les épidémies causées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clemens) dureront plus longtemps et s'aggraveront. En raison des changements climatiques, on s'attend à ce que la croissance des forêts soit variable, soit un ralentissement de la croissance due à la sécheresse dans les forêts situées dans certaines parties de l'Ouest du Canada, ce qui serait probablement le scénario le plus impressionnant à court et à moyen terme. En revanche, on anticipe une légère croissance des forêts situées dans l'Est. De tels impacts entraînent des répercussions sur le coût et l'approvisionnement du bois d'œuvre, et l'évolution du climat influera aussi sur les opérations forestières, les possibilités de loisirs, la biodiversité et la séquestration de carbone. La planification qui se basait sur le passé doit être réévaluée. Il se peut que les objectifs actuels concernant l'aménagement durable des forêts ne puissent pas être atteints dans le futur, même s'il existait de nouvelles opportunités. Il se peut que les changements climatiques aient des conséquences sur la sécurité publique, provoquent une importante rupture économique et sociale pour des communautés tributaires de la forêt comme celles des Autochtones, et qu'ils aient une incidence sur la compétitivité des entreprises ainsi que sur les mesures et politiques de tous les ordres de gouvernement. On peut réduire ces effets en cernant et en mettant en œuvre le plus tôt possible des mesures afin de réduire les vulnérabilités ou de tirer profit de nouvelles possibilités. Les éléments clés de l'adaptation du secteur forestier comprennent la sensibilisation et les débats, l'amélioration des connaissances et de l'information, des évaluations de la vulnérabilité, des cadres et des outils de planification ainsi qu'un renforcement de la coordination et coopération entre les gouvernements et avec les autres intervenants du secteur forestier. Il faudra un effort continu pendant de nombreuses années pour relever le défi de l'adaptation.

ABSTRACT

This report summarizes current knowledge about recent changes in the climate of Canada's forests and projects further changes over this century based on scenarios of future global greenhouse gas emissions developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change. Even with sustained reductions in global emissions the future climate is predicted to be quite different, meaning that adaptation will be essential. Impacts on the forest are already occurring and will be substantial in the future. The current upward trend in area burned annually is expected to continue. Forests will be prone to widespread stress induced by the changing climate, increasing the likelihood of pest outbreaks in the short to medium term. Recent outbreaks of several pests have exceeded in scope all previous known epidemics of these pests and are associated with the crossing of a climatic threshold. Invasion of the boreal forest by the mountain pine beetle, *Dendroctonus ponderosae* (Hopkins), appears likely, although the effect of this range expansion would likely be less severe than that observed recently in British Columbia, and outbreaks of the spruce budworm, *Choristoneura fumiferana* (Clemens), are predicted to be longer and more severe in the future. Future forest growth in response to climate change is expected to be variable, with growth reduction because of drought in parts of Canada's western forests perhaps the most dramatic short- to medium-term outcome, though modestly increased growth in the east is predicted. Such impacts have implications for the cost and characteristics of timber supply, and climate change will also affect forestry operations, recreation opportunities, biodiversity, and carbon storage. Planning based on past approaches will need to be reconsidered. Current objectives for sustainable forest management may not be attainable in the future, although there may be some new opportunities. Climate change may produce public safety risks, significant economic and social dislocation in forest-dependent communities including Aboriginal communities, and impacts on the competitiveness of companies as well as on the actions and policies of all levels of government. These effects can be reduced through early identification and implementation of actions to reduce vulnerabilities or take advantage of new opportunities. The key needs associated with adaptation in the forest sector include awareness building and debate, improved knowledge and information, vulnerability assessments, planning frameworks and tools, and enhanced coordination and cooperation among governments and other forest sector participants. Meeting the challenge of adaptation will require sustained effort for many years.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	ix
1. POURQUOI EST-IL SI IMPORTANT D'ADAPTER LE SECTEUR FORESTIER AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES?	1
2. QUE SAVONS-NOUS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET DE SON INCIDENCE SUR LES FORÊTS?.	2
2.1 Que se passe-t-il actuellement?	4
2.1.1 Comment le climat a-t-il évolué?	4
2.1.2 Quelles sont les incidences sur la forêt?	6
2.1.2.1 Incendies et perturbations biotiques	7
2.1.2.2 Réaction des peuplements forestiers — croissance.	8
2.1.2.3 Réaction du peuplement forestier — phénologie et dynamique des peuplements.	10
2.2 Quels seront les changements climatiques à venir?	10
2.2.1 Projection du climat futur	10
2.2.2 Projections du climat futur dans les forêts canadiennes	12
2.3 Quelles seront les incidences prévues sur les forêts du Canada?	17
2.3.1 Perturbation — incendie	17
2.3.2 Perturbation — biotique.	20
2.3.3 Croissance de la forêt	26
2.3.4 Évolution de la forêt	29
2.4 Quelles seront les incidences sur le secteur forestier du Canada?	30
2.4.1 Approvisionnement en bois d'œuvre	30
2.4.2 Opérations forestières	35
2.4.3 Collectivités tributaires des ressources.	36
2.4.4 Utilisations et valeurs forestières des produits non ligneux	37
3. QUELLE EST LA GAMME DE BESOINS EN MATIÈRE D'ADAPTATION?	41
3.1 Comment doit-on décider des mesures d'adaptation?	41
3.1.1 Définir le problème et les objectifs	42
3.1.2 Évaluer les vulnérabilités	43
3.1.3 Élaborer des stratégies d'adaptation.	43
3.1.4 Évaluer, prendre des décisions et mettre en œuvre	44
3.2 Quelle est la situation du secteur forestier en matière d'adaptation?	45
3.3 Que doit-on améliorer au processus d'adaptation du secteur forestier?	47
3.3.1 Sensibilisation et débat.	47
3.3.2 Amélioration des connaissances	47
3.3.3 Évaluations de la vulnérabilité.	49
3.3.4 Planification des cadres de travail et des outils	49
3.3.5 Coordination et coopération.	49
4. CONCLUSIONS	50
5. REMERCIEMENTS	51
6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	51

ANNEXES

1. ÉCOZONES TERRESTRES DU CANADA 59
2. RENSEIGNEMENTS SUR LES TENDANCES CLIMATIQUES 61

FIGURES

1. Régions forestières utilisées dans cette évaluation. 3
2. Exemple de la variation spatiale et temporelle des changements prévus (MCCG2-A2) de la température moyenne annuelle au Canada. 15
3. Régimes d'humidité du passé et du futur (MCCG2-A2) selon l'indice d'humidité (méthode Penman-Monteith simplifiée de Hogg [1997]). . 16
4. Rapport entre la superficie brûlée projetée ayant une concentration actuelle de 3 x CO₂ atmosphérique et la superficie brûlée projetée ayant une concentration actuelle de 1 x CO₂ atmosphérique par écozone en utilisant les modèles de circulation générale canadien et de Hadley. 19
5. Changements projetés (valeurs de 2081–2100 moins les valeurs historiques) dans (a) la durée de la pullulation de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (années) et (b) la gravité (pourcentage du changement dans la zone défoliée). 23
6. Futures répartitions des habitats dont le climat convient au dendroctone du pin ponderosa dans les pinèdes du Canada (pin tordu latifolié, pin gris, pin rouge et pin blanc de l'Est) d'après un modèle d'adéquation du climat et le MCGC1 ayant un scénario d'émissions équivalent à une augmentation annuelle de 1 % du taux de CO₂ atmosphérique. 24
7. Répartition des forêts touchées par la sécheresse dans la partie intérieure de l'Ouest canadien selon les conditions climatiques observées récemment (1961–1990) et selon un scénario climatique prévu pour 2041–2070 (MCCG2-A2). 28

TABLEAUX

1. Tendances de 5 variables climatiques pour 5 régions forestières de 1950 à 2003 (exprimées comme le changement pendant la période de 53 ans). 5
2. Estimations des variables climatiques actuelles et projections de celles du futur pour les régions forestières du Canada. 13
3. Évaluation qualitative des changements dans le domaine de la taille des zones touchées par les incendies en raison des changements climatiques, par région forestière. 17
4. Évaluation qualitative de la gravité de l'incidence des changements climatiques sur les perturbations biotiques, par région forestière. . . . 21

5. Évaluation qualitative de la gravité de l'incidence des changements climatiques sur la croissance forestière (productivité), par région forestière.	26
6. Évaluation qualitative de la gravité de l'incidence des changements climatiques sur l'approvisionnement de bois d'œuvre (selon la quantité, la qualité et la période), par région forestière.	31
7. Exemples des incidences des changements climatiques sur l'approvisionnement de bois d'œuvre au fil du temps.	33
8. Évaluation qualitative de l'échelle de l'incidence des changements climatiques sur les opérations forestières, par région forestière.	35
9. Exemples de questions stratégiques sur les changements climatiques posées par le secteur forestier.	48

SOMMAIRE

Le besoin d'adaptation

Dans son quatrième rapport d'évaluation, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) conclut qu'il ne fait aucun doute que le climat est en train de changer et affirme, avec de 90 % de certitude, que l'activité humaine est la cause de ces changements. Le GIEC a clairement exprimé que même d'importantes mesures de réduction d'émissions de gaz à effet de serre n'empêcheront pas le climat de continuer à changer au cours des prochaines dizaines d'années. L'adaptation doit donc faire partie des réponses aux changements climatiques; l'atténuation par elle-même est insuffisante.

Les forêts et autres terres boisées qui couvrent 40 % de la superficie du Canada forment un pilier important de l'assise économique, contribuent au bien-être de centaines de collectivités tributaires de ressources naturelles et procurent aux Canadiens une gamme de services environnementaux. Au Canada, les forêts sont déjà touchées par les changements climatiques, et selon des prévisions le climat pourrait être très différent de celui d'aujourd'hui, surtout dans les régions nordiques et continentales, où se trouvent la plupart des forêts. Certaines incidences sur les forêts seront bénéfiques, mais nombre d'entre elles ne le seront pas et varieront en fonction de l'emplacement et du temps. La gamme complète des intervenants du secteur forestier et les bénéfices qu'ils retirent des forêts seront touchés. En concentrant leurs efforts sur l'adaptation, le secteur forestier et ses intervenants peuvent aider le Canada à continuer de tirer profit de la forêt. Il importe en ce moment de demeurer vigilant, et ce, pour plusieurs raisons. Premièrement, les changements climatiques ont fait entrer le secteur forestier dans une période d'incertitude et de risque accrus pour laquelle une planification fondée sur des dynamiques forestières et des méthodes de gestion du passé ne convient plus. Deuxièmement, il se peut que les objectifs actuels de l'aménagement durable des forêts ne puissent pas être atteints; il est nécessaire de débattre afin de cerner des objectifs pertinents, qui tiennent compte des changements climatiques. Troisièmement, les changements climatiques risquent de provoquer une importante rupture

économique et sociale pour les collectivités tributaires des forêts et ils influenceront sur la compétitivité des entreprises ainsi que sur les mesures et politiques provenant de tous les ordres de gouvernements. Quatrièmement, il pourrait y avoir plus de risques pour la sécurité publique sous l'effet de l'augmentation en nombre et importance d'incendies de forêt, de tempêtes et d'inondations. Cinquièmement, les effets des changements climatiques peuvent être atténués si nous mettons en œuvre les efforts nécessaires pour cerner et réduire les vulnérabilités ou pour tirer profit de ces changements.

L'industrie canadienne des produits forestiers est déjà aux prises avec d'importants défis économiques; toutefois, si nous ne prenons pas des mesures pour nous adapter aux changements climatiques, la prospérité à long terme de l'industrie forestière et des collectivités tributaires de la forêt pourrait être touchée. Dans le secteur forestier, la prise conscience des changements climatiques en tant qu'enjeu général grandit rapidement, et on examine les aspects liés à l'adaptation. Jusqu'à ce jour, la plupart des mesures d'adaptation se sont concentrées sur l'amélioration des connaissances, l'éducation, l'échange d'information, l'exploration de besoins en matière d'adaptation, la prise en compte des changements climatiques dans les processus de planification et l'augmentation de la collaboration. D'importantes mesures d'adaptation systématiques et planifiées sur le terrain n'ont pas encore été appliquées pour répondre aux changements climatiques, principalement à cause de la complexité et des incertitudes liées à cet enjeu. Le présent rapport met en lumière le besoin de renforcer les mesures en matière d'adaptation.

Que savons-nous du changement climatique?

La figure ES.1 illustre les cinq régions forestières sur lesquelles se base cette étude. Le tableau ES.1 résume les projections de six variables climatiques entre la fin du 20^e siècle (1961–1990) et la fin du 21^e siècle (2071–2100) pour les cinq régions forestières. Nous avons choisi ces variables pour les rôles qu'elles jouent dans les processus des écosystèmes forestiers comme la croissance et la perturbation.

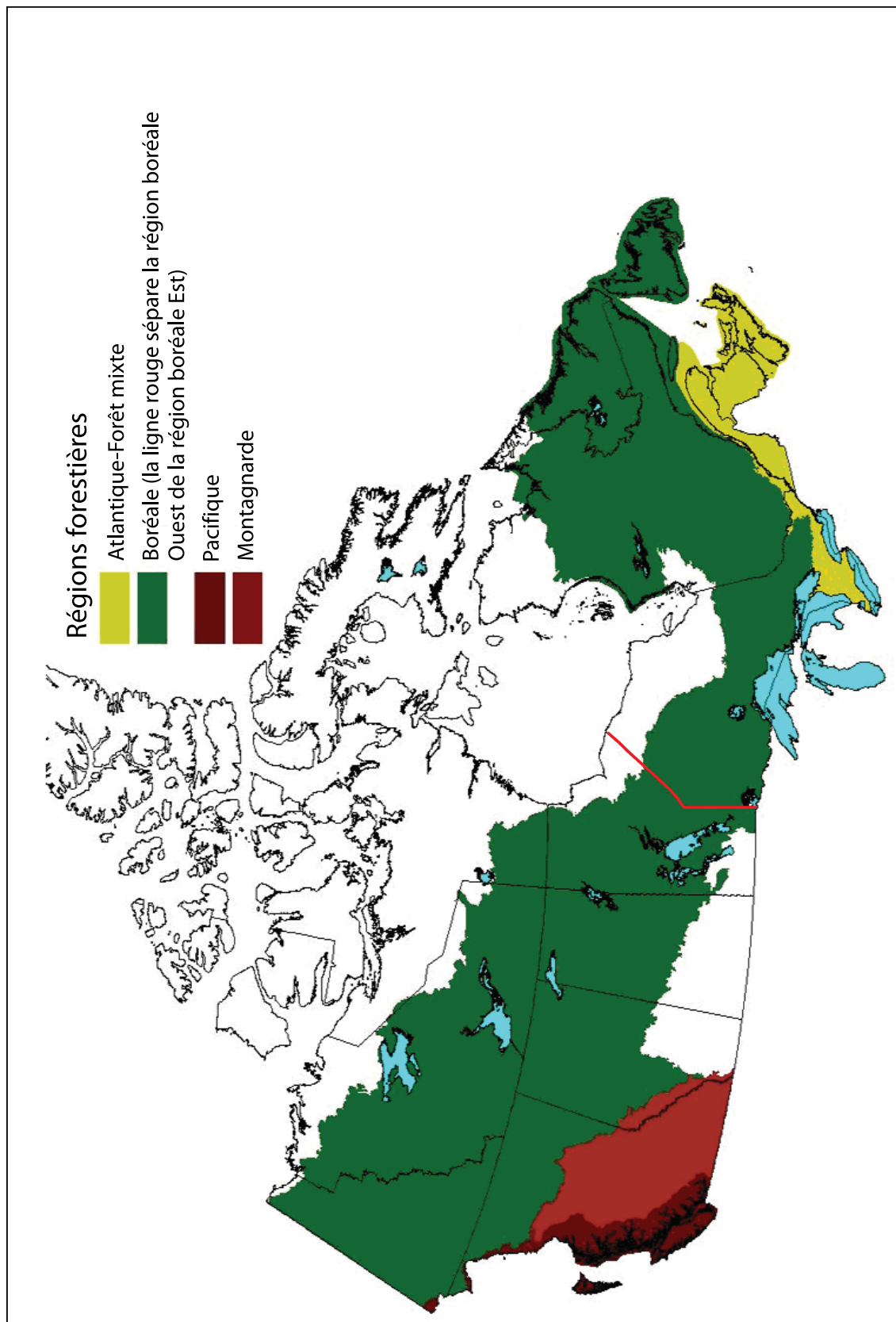


Figure ES.1. Régions forestières utilisées dans cette évaluation.

En examinant d'abord certains changements climatiques récents, nous observons des variations considérables depuis le milieu du 20^e siècle dans l'ensemble des régions forestières du Canada. Les hausses de température ont généralement été plus fortes dans l'Ouest et dans le Nord, tandis que les régions forestières boréale Ouest, montagnarde et du Pacifique ont connu des variations importantes. Ces régions indiquent une forte asymétrie dans leur modèle de réchauffement, ayant des hivers qui se réchauffent plus que les étés. Le modèle est inversé pour les précipitations : les plus fortes augmentations se produisant dans l'Est, tandis que les régions de l'Ouest ont connu peu de changement et même une diminution des précipitations dans la région du Pacifique. Au cours du dernier siècle et dans une grande partie du sud du Canada, on constate une diminution du nombre de jours ayant des températures extrêmement basses en hiver, au printemps et en été, et une augmentation du nombre de jours ayant des températures extrêmement élevées en hiver et au printemps.

Nous avons obtenu les projections pour la période 2071–2100 qui figurent au tableau ES.1 en effectuant la moyenne des données provenant de quatre modèles climatiques globaux (modèles de circulation générale) pour les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre A2 et B2 élaborés par le GIEC. Aucun scénario n'inclut de nouvelles mesures particulières pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ces scénarios sont différents puisque comparativement au scénario B2, dans le scénario A2 on présume qu'il y aura une croissance démographique plus élevée, une plus faible convergence des revenus dans l'ensemble des pays et des régions, une réduction des terres forestières, davantage de pollution, une plus grande intensité énergétique et une plus grande dépendance envers les combustibles fossiles. En l'an 2000, les émissions mondiales se chiffraient à environ 40 milliards de tonnes de dioxyde de carbone (cette mesure comprend le dioxyde de carbone, le méthane, l'oxyde de diazote et d'autres gaz à effet de serre plus puissants). Selon le GIEC, le niveau d'émissions selon le scénario A2 augmenterait de 250 % d'ici 2100, et la température moyenne mondiale augmenterait de 3,4 °C (fourchette probable de 2 à 5,4 °C). Le niveau d'émissions selon le scénario B2 augmenterait de 75 % par rapport à l'an 2000 et provoquerait une augmentation moyenne de la température de

2,4 °C (1,4–3,8 °C). Pour les deux scénarios, on prévoit un réchauffement plus prononcé sur les terres, aux latitudes nordiques, où se trouvent les forêts canadiennes.

Comme toute prévision, les projections climatiques présentent des incertitudes. Le GIEC considère que les scénarios A2 et B2 et les autres qu'il a utilisés se valent. En effet, si les émissions de gaz suivent l'un de ces modèles, il est probable que les prévisions de changements climatiques se réalisent. Nous avons choisi ces deux scénarios parce que nous croyons qu'ils représentent les modèles mondiaux plausibles d'émissions de gaz allant de bas à moyen (B2) à élevé (A2), pour le prochain siècle, si aucune mesure de réduction n'est prise dans le monde entier. Même si le scénario A2 semble extrême, les données actuelles disponibles révèlent que les émissions de dioxyde de carbone ont augmenté ces dernières années à un taux plus rapide que celui prévu par le scénario le plus pessimiste du GIEC.

Il est cependant important de garder à l'esprit que les scénarios utilisés dans cette étude ne prennent pas en considération les mesures qui pourraient être prises éventuellement à l'échelle planétaire dans les prochaines décennies afin réduire les émissions de gaz. L'une des manières d'évaluer les conséquences de telles mesures est d'examiner le scénario mondial B1 d'émissions de gaz du GIEC. Ce scénario envisage un virage rapide vers une économie de services et d'information et une utilisation accrue et relativement rapide des technologies propres et écoénergétiques, même si cela ne découle pas de nouvelles mesures visant précisément à aborder l'enjeu des changements climatiques. Selon ce scénario, les émissions de gaz en 2100 seraient 40 % inférieures à celles de 2000, mais la température moyenne mondiale augmenterait quand même de 1,8 °C (1,1–2,9 °C), et le climat continuerait à évoluer au-delà de 2100. Les augmentations pourraient être supérieures dans les terres forestières du Canada. Le GIEC laisse entendre qu'une augmentation de température de cette ampleur provoquerait néanmoins un changement considérable des écosystèmes. Il serait donc toujours aussi important de prendre des mesures d'adaptation pour le secteur forestier.

La figure ES.2 présente un exemple de variations spatiales et temporelles pour les

Tableau ES.1. Estimations des changements des variables climatiques entre 1961–1990 et 2071–2100. Les projections de 2071 à 2100 sont les moyennes des données de 4 modèles climatiques globaux pour les scénarios A2 et B2 d'émissions de gaz à effet de serre du GIEC. Les valeurs pour le Canada se basent sur le pays entier et pas seulement sur les régions forestières.

Changement entre 1961 et 1990 et entre 2071 et 2100									
Région	Scénario d'émissions ^a	Température moyenne annuelle (°C)	Température maximale le mois le plus chaud (°C)	Température minimale pour le mois le plus froid (°C)	Degrés-jours pendant la saison de croissance ^b (%) d'augmentation)	Précipitations annuelles (mm)	Indice d'humidité ^c (% changement)		
Atlantique-Forêt mixte	A2	4,7	4,7	5,9	65	64	-18,0		
	B2	3,5	3,4	4,8	46	59	-10,7		
Boréale Est	A2	5,3	4,8	7,8	96	93	-8,9		
	B2	3,8	3,5	6,1	67	76	-4,2		
Boréale Ouest	A2	4,9	4,1	6,5	86	69	-37,4		
	B2	3,6	2,9	4,5	61	57	-16,0		
Montagnarde	A2	4,1	5,0	4,4	104	63	-27,5		
	B2	3,1	3,7	3,7	75	54	-17,1		
Pacifique	A2	3,7	4,1	3,5	92	107	0,8		
	B2	2,8	3,1	2,7	66	65	0,3		
Canada	A2	5,0	4,6	6,7	87	74	-19,2		
	B2	3,7	3,3	5,0	61	61	-10,1		

^aScénarios d'émissions : A2 = scénario avec une économie de région où le taux d'augmentation d'émissions de gaz à effet de serre est comparable au taux d'augmentation des années 1990.

B2 = scénario avec une économie de région où les sociétés sont plus sensibles dans le domaine social et de l'environnement que dans le scénario A2, avec une croissance de population plus lente, une utilisation de l'énergie inférieure et une dépendance moins élevée sur les combustibles fossiles ce qui se traduit par un taux plus bas de l'augmentation d'émissions de gaz à effet de serre.

^bIndicateur de la chaleur totale disponible pour les plantes pendant la saison de croissance.

^cMesure du niveau d'humidité disponible pour les plantes pendant l'année. Une réduction indique moins d'humidité.

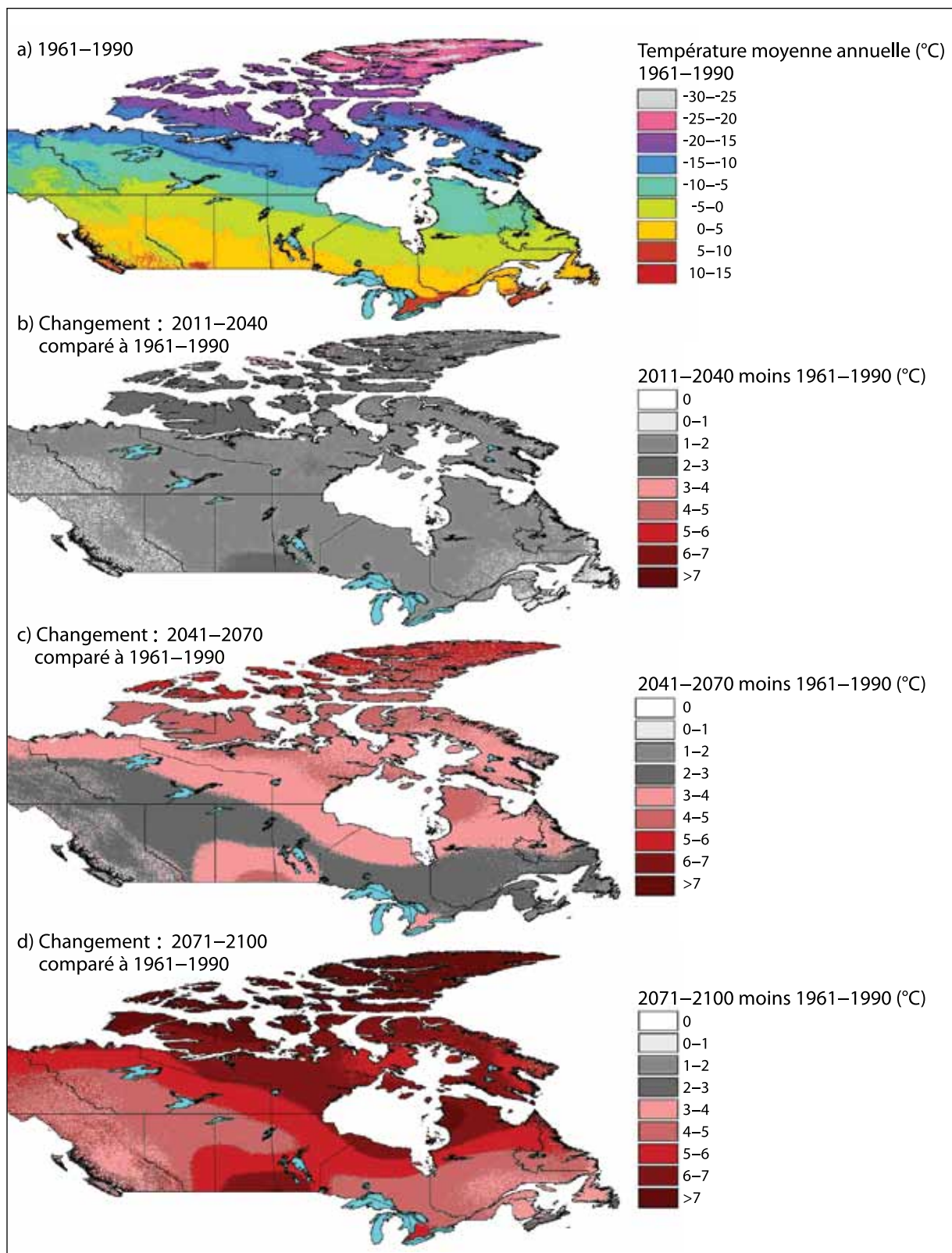


Figure ES.2. Exemple de la variation spatiale et temporelle des changements prévus (MCCG2-A2) de la température moyenne annuelle au Canada. a) température moyenne annuelle récente (1961–1990) et changement comparé à 1961–1990 pour b) 2011–2040, c) 2041–2070 et d) 2071–2100. MCCG2-A2 = Deuxième génération du modèle couplé climatique global canadien.

prévisions de changements de température. Cette série chronologique de cartes illustre les prévisions de changements de température moyenne annuelle dans un avenir proche (2011–2040), à moyen terme (2041–2070) et à long terme (2071–2100), selon les projections d'un modèle de circulation générale énoncé dans le scénario A2. Selon ces projections, une augmentation de 3 à 5 °C serait chose courante pour l'ensemble des régions forestières du Canada. Un autre modèle ou un autre scénario d'émission de gaz indiquerait probablement différentes prévisions et variations spatiales et temporelles. Cependant, même si les projections sont différentes, elles ont toutes tendance à indiquer que les changements les plus importants toucheront le nord du Canada et la région des Prairies.

Selon les scénarios d'émissions A2 et B2, les précipitations annuelles devraient aussi augmenter au cours du siècle dans toutes les régions forestières. Malgré ces hausses prévues, l'humidité disponible (selon l'estimation faite au moyen de l'indice d'humidité) devrait diminuer dans toutes les régions sauf celle du Pacifique (tableau ES.1) en raison de la hausse des températures qui provoquera des taux d'évaporation et de transpiration accrus. On verra davantage les effets de l'assèchement dans la partie intérieure de l'Ouest canadien, où les régimes d'humidité typiques des prairies pourraient s'étendre vers le nord et inclure une bonne partie de la région forestière boréale Ouest, selon le scénario A2 (figure ES.3).

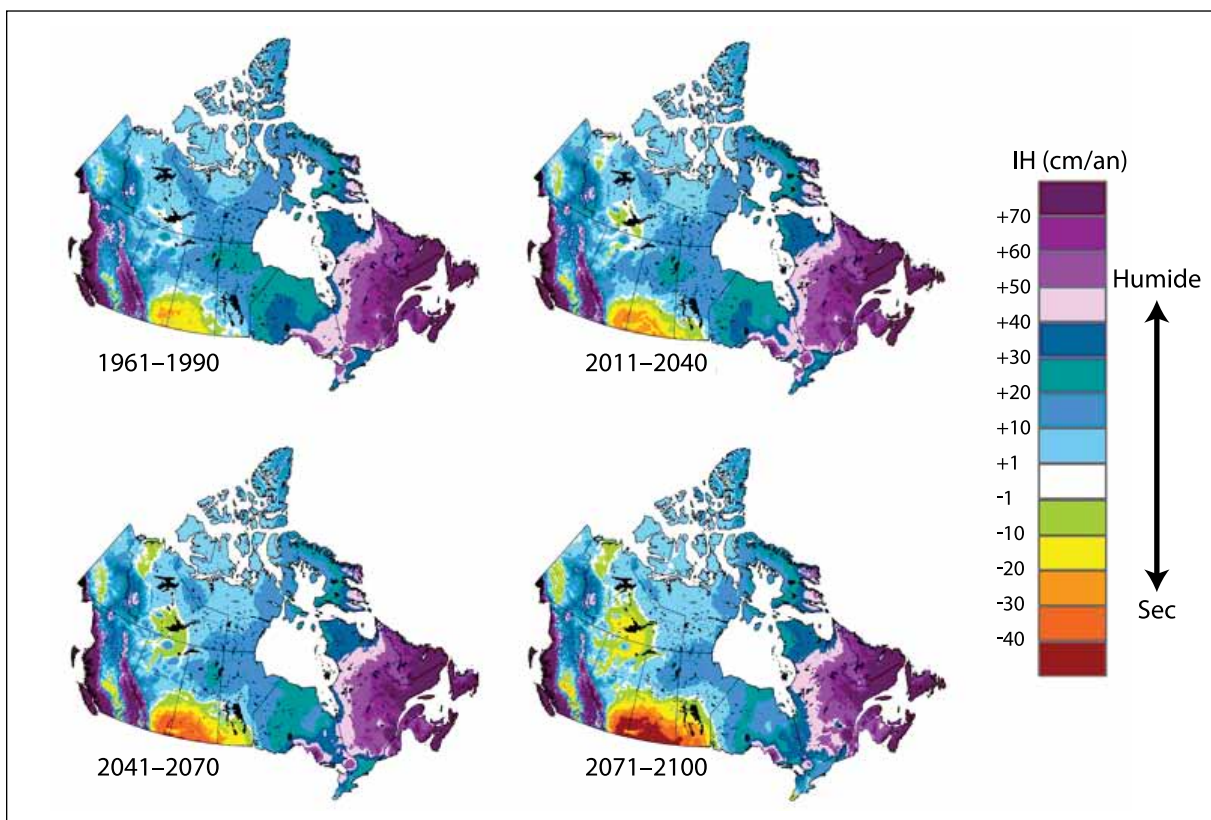


Figure ES.3. Régimes d'humidité du passé et du futur (MCCG2-A2) selon l'indice d'humidité (méthode Penman-Monteith simplifiée de Hogg [1997]). Les valeurs négatives indiquent les conditions typiques du climat des prairies ou des parcs. IH = indice d'humidité, MCCG2-A2= Modèle de circulation générale canadien couplé avec le scénario A2 dans lequel le taux d'augmentation des émissions de gaz à effet de serre est comparable au taux de l'augmentation dans les années 1990. Cartes de D. Price, M. Siltanen et D. McKenney.

Que savons-nous de l'incidence des changements climatiques sur les forêts et sur le secteur forestier?

Les changements climatiques produiront une combinaison d'effets sur la composition de la forêt, la productivité et les perturbations naturelles. Les effets des facteurs individuels entraîneront des interactions complexes du point de vue spatio-temporel et ceux-ci pourraient s'ajouter ou s'annuler à tout moment ou à n'importe quel endroit. D'autres facteurs influents qui ne sont pas reliés aux changements climatiques auront aussi un impact. Il est donc

important de procéder à une évaluation intégrée afin de prévoir les effets conjugués, et d'autres recherches sont nécessaires dans ce domaine. De plus, on ajoute un degré d'incertitude en déterminant l'incidence de la réponse de la forêt sur l'utilisation de la forêt par l'être humain et les valeurs qu'il lui accorde. Le tableau ES.2 présente un sommaire de l'évaluation dans ce rapport quant à l'incidence, actuelle et au cours du prochain siècle, des changements climatiques sur la forêt et les valeurs forestières. Pour ce type d'évaluation, le degré d'incertitude des prévisions s'accroît au fur et à mesure que les prévisions sont éloignées dans le temps.

Tableau ES.2. Évaluation qualitative par région de l'incidence des changements climatiques sur les forêts du Canada, l'approvisionnement en bois d'œuvre et les opérations forestières

Période	Atlantique- Forêt mixte	Boréale Est	Boréale Ouest	Montagnarde	Pacifique	Canada
Incendie (taille de la zone touchée)						
Actuellement	PC	++	+++	--	--	++
Court terme (2011–2040)	PC	++	+++	++	+	++
Moyen terme (2041–2070)	+	+++	+++	+++	++	+++
Long terme (2071–2100)	++	+++	+++	+++	+++	+++
Perturbation biotique (selon la taille de la zone touchée, la gravité et la fréquence)						
Actuellement	PC	PC	++	+++	+	+
Court terme (2011–2040)	+	+	+++	++	++	++
Moyen terme (2041–2070)	++	++	+++	?	++	+++
Long terme (2071–2100)	?	?	?	?	?	?
Croissance de la forêt (productivité)						
Actuellement	?	?	?	?	?	?
Court terme (2011–2040)	+	+	-	-	PC	?
Moyen terme (2041–2070)	+	++	-	--	PC	?
Long terme (2071–2100)	+	++	--	---	PC	?
Approvisionnement en bois d'œuvre (selon la quantité, la qualité et la saison)						
Actuellement	PC	+	+	+++	PC	++
Court terme (2011–2040)	+	-	+	+	PC	+
Moyen terme (2041–2070)	+	-	--	--	+	-
Long terme (2071–2100)	+	-	-	-	+	-
Opérations forestières						
Actuellement	PC	-	-	---	PC	--
Court terme (2011–2040)	PC	-	--	-	PC	-
Moyen terme (2041–2070)	+	-	-	+	-	-
Long terme (2071–2100)	+	-	-	+	-	-

PC = pas de changement observé/attendu. ? = incertain. Échelle de l'incidence (augmentation/réduction des perturbations et de la croissance, positives/négatives pour l'approvisionnement de bois d'œuvre et les opérations forestières) comme indiqué ci-après. Augmentation/positive + bas, ++ modéré, +++ élevé
Réduction/négative : - bas, -- modéré, --- élevé.

Perturbations naturelles

Pour une grande partie des forêts du Canada, le feu représente le principal agent de renouvellement des peuplements et il exerce une influence considérable sur la structure et la fonction des forêts. Aujourd'hui, plus de deux millions d'hectares en moyenne brûlent chaque année au Canada. Depuis le début des années 1970, il existe une tendance à la hausse des incendies de forêt en plus d'une augmentation du nombre d'incendies et de la superficie brûlée chaque année. La tendance est générale; elle varie toutefois dans l'ensemble du pays. Elle est en effet plus marquée dans les écozones occidentales de la taïga et du Bouclier boréal (région boréale Ouest). La température représente l'indicateur de prévision le plus important concernant la superficie brûlée; il existe en effet une relation directe entre les hausses de température et l'augmentation de la superficie brûlée, d'où l'explication de l'augmentation de la superficie brûlée par le réchauffement climatique actuel. Une aggravation du réchauffement climatique prolongera la saison des incendies et fera grimper l'indice saisonnier de gravité d'incendie dans l'ensemble du Canada, ce qui porte à croire que la moyenne de superficie brûlée annuellement continuera de s'accroître. Nous n'avons que peu d'études sur le sujet; l'une de celles-ci indique que la superficie brûlée pourrait augmenter d'environ 74 à 118 % d'ici la fin du siècle en se basant sur des données historiques illustrant la relation entre les conditions météorologiques (danger d'incendie) et la superficie brûlée par rapport aux projections climatiques d'après les tendances récentes d'émissions.

Les insectes herbivores, les pathogènes et les parasites font partie intégrante de la forêt, et certains d'entre eux peuvent se propager sur de vastes étendues et causer de sérieux retards de croissance ou un niveau élevé de mortalité. Chaque année, la superficie des forêts en Amérique du Nord infestée par ces agents de perturbation biotique est souvent beaucoup plus supérieure à celle touchée par les incendies. Les relations entre le climat et l'abondance et l'aire de répartition de ces agents sont complexes, ce qui rend difficile la prévision qu'auront sur eux les effets des changements climatiques.

Les forêts les plus humides de l'est du Canada ont été jusqu'à maintenant plus sensibles que d'autres régions à l'invasion à grande échelle de ravageurs comme la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clemens). Par ailleurs, la région de l'Ouest canadien a subi récemment des invasions sans précédent comme celle du dendroctone du pin ponderosa en Colombie-Britannique et en Alberta, du dendroctone de l'épinette (*Dendroctonus rufipennis* Kirby) au Yukon et de la brûlure en bandes rouges dans le nord-ouest de la Colombie-Britannique. Même si ces invasions varient en étendue, elles dépassent en envergure toutes les invasions précédentes causées par chacun de ces ravageurs, touchent les espèces indigènes ou les résidents à long terme des régions où l'invasion a débuté et sont associées au franchissement du seuil climatique en termes de précipitations estivales ou de températures hivernales.

En ce qui concerne l'avenir, nous pouvons nous prononcer sur la fréquence et la gravité des perturbations biotiques. Premièrement, pour ce qui est des espèces trouvées dans l'aire de répartition de leur arbre hôte (c.-à-d. les espèces indigènes ubiquistes), un réchauffement climatique pourrait avoir une incidence sur la fréquence, la durée et la gravité des épisodes de perturbations. Deuxièmement, pour ce qui est des espèces indigènes mais qui n'occupent pas la totalité de l'aire de répartition de leur arbre hôte (c.-à-d. les espèces indigènes envahissantes), les changements climatiques pourraient influencer sur l'étendue des invasions ainsi que sur la fréquence, la durée et la gravité. Troisièmement, pour ce qui est des espèces indigènes qui n'ont pas eu d'incidence dans le passé (c.-à-d. les espèces indigènes inoffensives), les changements climatiques pourraient favoriser une vaste invasion. Quatrièmement, pour ce qui est des espèces exotiques (c.-à-d. les espèces exotiques envahissantes), un réchauffement climatique pourrait accroître le risque d'implantation. Des projections ont été avancées pour deux espèces importantes d'insectes : la tordeuse des bourgeons de l'épinette (espèce indigène ubiquiste) qui est sans doute le ravageur le plus important dans le centre et l'est du Canada, et le dendroctone du pin ponderosa (une espèce indigène envahissante) qui est le ravageur le plus important dans les

forêts de pins de l'Ouest. Selon un scénario d'émission de gaz relativement faible (c-à-d. inférieur à celui du scénario B2), on prévoit que les changements climatiques provoqueront une invasion de la tordeuse des bourgeons de l'épinette entre 2081 et 2100 qui durera 6 ans de plus qu'habituellement et fera augmenter la défoliation de 15 %. En combinant l'utilisation d'un modèle écoclimatique avec les projections de changements climatiques, on prévoit que les pinèdes boréales du Canada deviendraient plus susceptibles à l'invasion du dendroctone du pin ponderosa dans un avenir prochain, ce qui semble probable de se produire, quoique l'effet de cette expansion serait probablement moindre que celle observée récemment en Colombie-Britannique. En résumé, il est très probable qu'il y aura une augmentation à court et à moyen terme des effets provenant de perturbations biotiques; par conséquent, les forêts seront plus sensibles aux facteurs de stress généralisés causés par les changements climatiques.

Réaction des forêts aux changements climatiques

Nous pouvons avancer quelques généralisations sur la réaction de la croissance des forêts face aux récents changements climatiques au Canada. Les réactions locales et régionales sont probablement attribuables aux essences propres à un endroit particulier et à la dynamique des peuplements en plus du changement climatique régional, et nous observons à la fois une accélération et un retard de la croissance de la forêt. La productivité de la forêt boréale du Canada a récemment décliné, surtout de 2001 à 2004, lorsque de vastes étendues ont été touchées par la sécheresse. On prévoit une croissance variable des forêts en réaction aux changements climatiques dans l'ensemble du pays et selon les essences. Le résultat le plus frappant à court et à moyen terme sera probablement la réduction de croissance imputable à la sécheresse dans de nombreuses régions boisées de l'Ouest. En revanche, on prévoit une légère accélération de croissance dans l'Est. La phénologie d'essences modifiée (p. ex. date du débourrement ou de la défeuillaison) et la répartition sont d'autres indications de l'incidence des changements climatiques. Il est difficile de détecter de petits changements dans le contexte d'une forte variabilité naturelle; néanmoins, l'évaluation générale tend à montrer qu'il est très probable

que les changements climatiques ont eu une incidence sur la phénologie; par ailleurs, cette incidence n'a pas encore fait l'objet d'abondantes observations et de relevés.

La valeur généralement reconnue en matière de migration des essences forestières est de 50 km par siècle. Toutefois, il se peut que les changements climatiques entraînent un déplacement des isothermes (ligne de température égale) vers le nord d'environ 300 km dans les prochains 50 ans pour la grande partie du Canada si la température moyenne annuelle augmente de 2 °C, déplaçant ainsi vers le nord les zones de conditions climatiques favorables aux essences forestières. Ceci dépasserait de loin les prévisions les plus optimistes concernant la capacité migratoire des essences forestières. Ainsi, sans intervention humaine, un changement de dominance se produira parmi les essences qui composent la forêt sans qu'il soit imputable à une invasion de nouvelles essences. Les agents de perturbation à grande échelle fourniront l'incitation la plus radicale pour de tels changements dans la composition des peuplements. Par exemple, des conditions de croissance chaudes et sèches favoriseraient des essences comme le tremble (*Populus* spp.) et le bouleau, qui se régénèrent par voie végétative après une sécheresse ou un incendie, et celles-ci supplanteraient les conifères qui se reproduisent par dissémination des graines. De tels changements régionaux pourraient se produire très rapidement durant les prochaines décennies.

Incidences des changements climatiques sur l'activité humaine et les avantages non marchands

Les incidences décrites précédemment ont des répercussions sur le coût, la qualité, la quantité et l'accessibilité du bois d'œuvre ainsi que sur la quantité et l'emplacement des travaux liés à la récupération. Il se peut que de futures améliorations de la productivité forestière puissent améliorer à long terme l'approvisionnement en bois d'œuvre dans certaines régions, mais c'est l'incidence de l'augmentation des perturbations sur l'approvisionnement de bois d'œuvre qui dominera dans la plupart des régions. Des perturbations naturelles importantes comme l'invasion actuelle du dendroctone du pin ponderosa sont susceptibles de générer

temporairement de larges quantités de produits pour la récupération. En retour, ceci crée toute une série de défis pour la gestion des infrastructures et des forêts, y compris la difficulté d'accéder aux arbres tombés, les défis liés à la capacité industrielle et à la technologie nécessaire pour traiter la hausse de volume, des questions de transport concernant le déplacement de grandes quantités de bois mort ou traité et des problèmes d'accès au marché pendant les périodes d'approvisionnement important. De nouvelles difficultés feraient ensuite surface en raison du manque de bois d'œuvre local et régional qui s'ensuivrait.

Les changements climatiques influenceront aussi sur les opérations et les pratiques forestières comme le temps de la récolte et la construction routière. Des hivers plus courts et plus chauds réduiront la durée et l'utilité des chemins d'hiver. Une diminution de la récolte hivernale attribuable aux problèmes d'accès ainsi qu'une période de récolte estivale restreinte en raison du risque d'incendies occasionneront une diminution de la période de la récolte, une récolte moins abondante et une majoration considérable des coûts du bois. Les changements liés au moment et au volume du débit de pointe des ruisseaux (p. ex. l'augmentation des eaux de ruissellement) pourraient endommager les routes et d'autres infrastructures comme les bâtiments, ce qui influera sur les méthodes en matière de construction de routes et d'autres infrastructures.

Les forêts procurent non seulement du bois d'œuvre mais aussi de nombreux avantages non marchands aux Canadiens, puisqu'elles représentent des valeurs écologiques, culturelles, patrimoniales et d'ordre esthétique. Les parcs et les aires protégées offrent des possibilités de loisirs très appréciées et répondent à des objectifs importants en matière de préservation et de patrimoine. Toutefois, les changements climatiques pourraient faire en sorte que ces espaces voués à la préservation ne soient plus en mesure de représenter les écosystèmes pour lesquels ils étaient mandatés de représenter. La durée des saisons de loisirs sera différente en raison du raccourcissement des hivers et de l'allongement des étés, ce qui pourrait occasionner des incidences positives ou négatives sur le tourisme et les loisirs, selon l'endroit et

les types d'activités en question. Les services que procurent les écosystèmes forestiers des forêts du Canada seront touchés, notamment la purification de l'air et de l'eau, les plantes médicinales, le cycle de substances nutritives et le contrôle d'érosion. La diversité des essences et d'autres espèces dans les forêts du Canada sera modifiée. Par exemple, certaines essences qui s'adaptent bien aux endroits ravagés par les incendies se répandront, notamment le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) et le tremble. En général, la perte de la biodiversité nuira à la capacité des écosystèmes forestiers d'amortir les effets de changements consécutifs et de conserver leur structure fondamentale et leur fonction. Il convient également de signaler les répercussions des changements climatiques sur les stocks de carbone forestier. Il est probable qu'une augmentation des perturbations naturelles entraîne une période au cours de laquelle on observe dans la forêt une diminution des réserves de carbone forestier et une augmentation des émissions de gaz à effet de serre.

Tous ces éléments pourraient profondément ébranler la base économique des collectivités tributaires des ressources forestières, y compris les collectivités autochtones. De plus, la fréquence et la gravité accrues des incendies de forêt, des sécheresses et des perturbations biotiques augmenteront très probablement les risques pour la sécurité publique et les dommages liés aux biens personnels. Les valeurs touristiques, culturelles et d'ordre esthétique liées aux forêts seront aussi touchées.

Quels sont les besoins en matière d'adaptation?

Au cours des prochaines dizaines d'années, la gestion durable des forêts du Canada devra relever des défis considérables en raison des changements climatiques. L'adaptation aux changements climatiques se fait de façon autonome dans les systèmes naturels, alors que du point de vue de la gestion, elle requiert des efforts délibérés pour atténuer les dommages éventuels ou pour tirer profit des nouvelles possibilités. L'adaptation a un coût; elle joue toutefois un rôle essentiel pour fournir une réponse efficace et économique aux changements climatiques.

L'incertitude constitue le défi le plus considérable en matière d'adaptation, mais cela n'est pas une raison suffisante pour ne pas examiner le problème. Il est difficile de prédire comment les changements climatiques évolueront, surtout à l'échelle locale et régionale, ce qui est aggravé lorsqu'on prend en considération l'incidence des changements climatiques sur la forêt et sur l'état futur de la forêt, le degré de vulnérabilité de la forêt par rapport aux changements climatiques et le niveau de faisabilité, ou même de pertinence, des objectifs de gestion. Qui plus est, les effets des changements climatiques se produiront en même temps que d'autres changements inconnus. L'incertitude fait partie de tout processus de planification, mais la plupart des gestionnaires forestiers tenaient habituellement pour acquis que les conditions actuelles persisteraient et ils ne prennent pas en compte de façon importante l'incertitude climatique ou écologique. L'hypothèse selon laquelle les conditions actuelles persisteront devient de plus en plus contestable au fur et à mesure que les projections liées aux changements climatiques sont éloignées dans le temps. Par conséquent, on aura besoin d'intégrer explicitement le degré accru d'incertitude au moment de la prise de décision à tous les niveaux de gestion.

La prise de conscience des changements climatiques en tant qu'enjeu a connu une évolution rapide dans le secteur forestier, grâce à la publication récemment d'un certain nombre d'évaluations des incidences et des besoins en matière d'adaptation et grâce à la recherche continue de scientifiques provenant des gouvernements fédéral et provinciaux ainsi que des universités. Le Conseil canadien des ministres des forêts a ouvert le débat sur l'incidence des changements climatiques sur la forêt et le secteur forestier au Canada et lors de sa réunion en 2007, le Conseil a établi que l'adaptation aux changements climatiques constituait un nouvel enjeu stratégique pour le secteur. Les gouvernements provinciaux et territoriaux adoptent des mesures en élaborant des stratégies pour faire face aux changements climatiques, en appuyant les recherches dans le domaine et en s'efforçant d'accroître la sensibilisation liée au besoin en matière d'adaptation. Des ateliers régionaux ont été tenus afin d'explorer l'incidence des changements climatiques sur le secteur forestier et les options

que présente l'adaptation dans des contextes particuliers. Certaines évaluations ont eu lieu à l'échelle des collectivités tributaires des forêts, et quelques entreprises ont tenté d'incorporer la question des changements climatiques dans leurs plans de gestion des forêts.

De nombreuses mesures d'adaptation propres à la forêt ont été proposées à diverses échelles, soit locale, régionale et nationale. Nous serons mieux à même de déterminer les besoins en matière d'adaptation et le choix de mesures à prendre lorsque nous aurons adopté une approche systématique concernant les prises de décision liées à l'adaptation, mais nous n'avons pas encore de cadre établi pour ce faire. Une démarche structurée de gestion des risques par rapport à l'adaptation nécessite plusieurs étapes.

Premièrement, il faut établir des objectifs de gestion appropriés pour la forêt dans l'avenir et proposer des mesures réalisables en matière d'adaptation. Les objectifs peuvent se baser sur des critères actuels et sur des indicateurs de gestion durable des forêts, mais il faut reconnaître que les objectifs actuels pourraient ne plus être pertinents compte tenu de l'évolution du climat. Il est possible que l'on ait besoin de se concentrer sur le maintien ou l'amélioration de la résilience de la forêt en raison des changements climatiques.

Deuxièmement, il faudra évaluer les facteurs de vulnérabilité actuels et à venir qui influent sur la réalisation des objectifs. Ce processus est primordial aux prises de décision en matière d'adaptation. La vulnérabilité représente l'ampleur selon laquelle un système naturel risque de subir des dommages. Un système peut être vulnérable à toute échelle, soit locale, régionale ou nationale. La vulnérabilité d'un système dépend de son degré d'exposition aux changements climatiques, du degré de sensibilité du système face aux objectifs qui ont été établis et aux valeurs qui s'y rattachent ainsi que de la capacité du système à s'ajuster ou à s'adapter. On détermine la capacité d'adaptation par les caractéristiques du secteur et de ses intervenants. L'adaptation peut être perçue comme une série de choix afin d'atténuer la vulnérabilité en diminuant le niveau de sensibilité, en facilitant ou en améliorant la capacité d'adaptation et en tirant profit des possibilités.

Troisièmement, il faudra élaborer des stratégies d'adaptation pour tenir compte des facteurs de vulnérabilité ou tirer profit des possibilités. Ces stratégies devraient reconnaître les effets cumulatifs, le risque et l'incertitude ainsi que les divers besoins des différents intervenants. Elles devraient rechercher, dans la mesure du possible, la synergie entre les diverses mesures d'atténuation. L'aspect intégration est important, car l'adaptation la plus efficace et réussie ne pourra se faire que grâce à l'intégration systématique des facteurs climatiques dans les cadres actuels de planification forestière et de prises de décision. Les stratégies proactives sont probablement préférables aux approches réactives puisqu'elles permettraient d'éviter ou de réduire les facteurs de vulnérabilité et les effets négatifs.

Quatrièmement, les stratégies en matière d'adaptation doivent être évaluées, les gestionnaires doivent choisir les mesures à adopter, et la stratégie (ou les stratégies) doit être appliquée et surveillée. On peut utiliser de multiples critères décisionnels afin d'évaluer diverses options de stratégies d'adaptation et leurs compromis. Parmi ces critères, notons ceux liés à l'incertitude, à l'économie, y compris l'efficacité et l'incidence sur la compétitivité, aux aspects sociaux comme l'égalité et les incidences sociales, et à l'environnement. La prise de décision en matière d'adaptation sera renforcée si l'ensemble des intervenants du secteur forestier participe à toutes les étapes de planification en matière d'adaptation. Les intervenants auront différents niveaux de connaissance, points de vue et buts.

Le présent rapport laisse entendre que le secteur forestier présente les besoins suivants en matière d'adaptation :

- Sensibilisation et débat
 - Accroître la sensibilisation aux changements climatiques, aux risques, au besoin en matière d'adaptation et aux éventuelles options et stratégies.
 - Débattre les objectifs concernant les forêts de l'avenir, notamment les valeurs, les attentes, les buts et l'incidence des changements climatiques sur celles-ci.
- Amélioration des connaissances et de l'information
 - Poursuivre et élargir la recherche sur les changements climatiques et sur ses effets
 - Améliorer les relevés de surveillance climatique et élargir la surveillance aux régions nordiques et boisées de haute altitude
 - Rendre accessible les scénarios de changements climatiques à l'échelle régionale afin de réduire le sentiment d'incertitude par rapport à ce qui nous attend et quand cela aura lieu
 - Améliorer les programmes et les systèmes de surveillance pour connaître rapidement les réactions de la forêt aux changements climatiques
 - Évaluer les effets possibles des changements climatiques sur les stocks de carbone, les habitats et la biodiversité et sur les autres avantages écologiques, y compris les parcs et les aires protégées
 - Établir des scénarios de l'incidence des changements climatiques sur l'approvisionnement en bois d'œuvre et les répercussions sur les opérations de récupération, les marchés des produits forestiers, les usines et les collectivités
 - Établir des scénarios de l'incidence des changements climatiques sur la compétitivité de l'industrie des produits forestiers du Canada
 - Évaluer d'autres effets sociaux et économiques des changements climatiques comme les effets sur les communautés autochtones
 - Dresser la liste des options viables en matière d'adaptation (y compris leurs coûts et les incertitudes qui leur sont associées) qui tiennent compte d'objectifs comme le maintien de l'habitat et de la biodiversité, le soutien en matière de régénération des forêts, l'optimisation des produits forestiers ou la gestion de la forêt afin d'optimiser sa contribution aux mesures d'atténuation des changements climatiques
 - Mettre sur pied des projets pilotes et des démonstrations qui fournissent une expérience sur le terrain.

- Évaluation de la vulnérabilité à des échelles applicables pour la prise de décision
 - Établir des outils rigoureux en matière d'évaluation de la vulnérabilité et utilisables dans une variété de circonstances
 - Déterminer la capacité d'adaptation des intervenants du secteur et évaluer les leçons tirées d'exemples d'adaptation actuels face à des événements perturbateurs
- Cadres et outils de planification à des échelles applicables pour la planification proactive en matière d'adaptation et la prise de décision par divers intervenants du secteur ayant des objectifs différents
 - Se doter d'outils opérationnels comme des modèles de croissance et de rendement pour le climat
 - Disposer de techniques pour comprendre et intégrer les éléments d'incertitude et de risque dans les prises de décision courantes pour le secteur forestier (p. ex. la promotion de la gestion adaptative)
 - Avoir des cadres de travail pour comprendre comment les politiques forestières actuelles, les règlements et les pratiques pourraient être modifiés pour assouplir les interventions sans compromettre celles à venir
- Coordination et coopération afin d'atteindre efficacement les besoins mentionnés précédemment
 - Augmenter les mécanismes liés à la communication, au travail d'équipe et à la mise en commun de l'information, des connaissances et de l'expérience

Le besoin le plus important en matière d'adaptation consiste peut-être à discuter de l'incidence qu'auront les changements climatiques sur les valeurs que l'on retire de la forêt, puisque ces changements peuvent influencer sur toutes ces valeurs. Par ailleurs, il est improbable que les mesures en matière d'adaptation soient la panacée pour remédier à tous les effets possibles des changements climatiques. Qui plus est, nous ne devons pas nous attendre à ce que ces mesures puissent protéger les valeurs qui nous concernent. Nos besoins en matière de produits forestiers et de services doivent être révisés en fonction de ce qui est faisable sur le plan de l'adaptation et en fonction des nouvelles possibilités qui s'offriront à nous.

Il faudra un effort continu pendant de nombreuses années afin de relever les défis liés à l'adaptation. Les changements climatiques relativement mineurs au cours des dernières dizaines d'années ont déjà eu une incidence notable sur les forêts, et bien qu'il existe beaucoup d'incertitude quant au caractère, à l'emplacement et à l'ampleur des effets à venir, nous savons qu'ils auront lieu. Même si à l'échelle mondiale nous réussissons à réduire considérablement les émissions de gaz dans les prochaines décennies, un certain degré de changement climatique est inévitable et nous devons prendre des mesures en matière d'adaptation.

1. POURQUOI EST-IL SI IMPORTANT D'ADAPTER LE SECTEUR FORESTIER AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES?

Il ne fait aucun doute que le climat évolue. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a conclu que les changements climatiques ont lieu et affirme (avec 90 % de certitude) que les activités humaines en sont responsables (Solomon et coll. 2007). Le GIEC a également exprimé la conviction que l'évolution du climat se poursuivra dans une certaine mesure pendant de nombreuses décennies, même si des mesures musclées de réduction d'émissions de gaz à effet de serre sont entreprises à l'échelle mondiale. L'adaptation doit donc faire partie de la réponse aux changements climatiques; les mesures d'atténuation sont en effet insuffisantes (Parry et coll. 2007; Lemmen et coll. 2008). De nombreux pays reconnaissent la situation actuelle selon laquelle on doit poursuivre pendant les prochaines décennies les efforts de réduction des émissions dans le monde tout en prenant davantage de mesures en matière d'adaptation aux changements climatiques. Les meilleures mesures seront celles qui contribueront à la fois à l'atténuation et à l'adaptation.

Les forêts et autres terres boisées qui couvrent 40 % de la surface du Canada, constituent un secteur économique très important, desservent des centaines de collectivités tributaires de la forêt et fournissent une variété de services environnementaux aux Canadiens. D'après des projections climatiques, le climat des forêts au Canada sera bien différent dans l'avenir, surtout dans les régions nordiques et continentales intérieures où se trouvent la plupart des forêts. Certains effets sur les forêts pourraient être bénéfiques, alors que nombre d'autres ne le seront pas, et les effets varieront selon l'emplacement et le temps. Ces effets influenceront entre autres sur la productivité forestière, la durée de la saison de croissance, la fréquence et la gravité de la sécheresse ainsi que les régimes de perturbation liés aux incendies et aux ravageurs. En fait, les écosystèmes forestiers au Canada sont déjà touchés; par exemple, le dépérissement causé par la sécheresse a déjà lieu dans certaines régions. Il existe de fortes indications que la fréquence et l'ampleur des

incendies de forêt ont augmenté au cours des dernières décennies et en parallèle avec les changements climatiques. Ceux-ci ont également contribué aux invasions du dendroctone du pin ponderosa et d'autres ravageurs et repoussent les frontières climatiques, favorisant ainsi l'invasion de ravageurs provenant de climats plus chauds.

L'ensemble des intervenants du secteur forestier seront touchés par de tels changements : gouvernements, industries et collectivités tributaires de la forêt, y compris les communautés autochtones. Ces changements auront aussi une incidence sur le bois d'œuvre et la transformation du bois, les loisirs, les parcs et les avantages liés aux écosystèmes, comme la biodiversité et le recyclage du carbone. Si le secteur forestier et ses intervenants ne s'efforcent pas de s'adapter maintenant, la capacité future du Canada de tirer avantage de la forêt pourrait être compromise. Un certain nombre de raisons exigent une attention immédiate. Premièrement, en raison des changements climatiques, le secteur forestier entre dans une période d'incertitude et de risque accrus pour laquelle une planification fondée sur d'anciennes dynamiques forestières et méthodes de gestion deviendra de plus en plus inappropriée. De plus, les décisions relatives à la gestion forestière ont souvent des conséquences à long terme irréversibles. Deuxièmement, il se peut que les objectifs actuels de gestion durable des forêts ne puissent pas être atteints. Pour déterminer des objectifs appropriés aux changements climatiques, il faut de la sensibilisation, des débats publics et un dialogue. Troisièmement, les changements qui, en raison du changement climatique, influenceront sur l'approvisionnement de bois d'œuvre, les possibilités de loisir et d'autres valeurs qui découlent de la forêt, risquent d'engendrer d'importants bouleversements économiques et sociaux. La compétitivité des entreprises sera aussi atteinte par ces changements tout comme les mesures et politiques de tous les ordres de gouvernement. Quatrièmement, les risques pour la sécurité publique pourraient s'accroître, tandis que la fréquence et l'ampleur des incendies,

des tempêtes et des inondations augmenteront. Cinquièmement, on peut réduire l'incidence des changements climatiques si on met en œuvre au fil du temps les efforts pour cerner et réduire les facteurs de vulnérabilité ou pour tirer profit des changements. La planification de mesures proactives est probablement la démarche la plus rentable et celle qui récoltera le plus de succès. Elle permettra de tenir compte des facteurs de vulnérabilité et de faire en sorte que l'adaptation devienne un incontournable dans toute prise de décision en matière de changements climatiques (une approche connue sous le terme « intégration »). En se concertant et en apprenant de l'expérience des autres, les intervenants du secteur forestier peuvent contribuer à réduire les coûts liés à l'adaptation.

L'industrie canadienne des produits forestiers fait face à des défis d'envergure issus des changements sur les marchés mondiaux, l'approvisionnement de bois d'œuvre, les taux de change et les coûts. Ces changements ont des répercussions importantes sur la compétitivité et l'emploi et portent à croire que la réflexion sur les mesures à long terme en matière d'adaptation ne constitue pas une priorité. Pourtant, si l'on ne met pas en œuvre des mesures d'adaptation aux changements climatiques, il est probable que la santé à long terme de l'industrie et des collectivités qui en dépendent sera compromise. La clé d'une adaptation réussie consiste à étudier la manière d'accroître la capacité d'adaptation et la marge de manoeuvre pour aborder les changements climatiques et les autres questions qui touchent le secteur forestier.

Les gouvernements, l'industrie et les collectivités ont commencé à tenir compte de l'adaptation. Le présent rapport établit clairement le fondement pour comprendre le besoin de renforcer les initiatives d'adaptation. La prochaine section commence par une évaluation scientifique des connaissances sur l'incidence des changements climatiques sur la forêt du Canada. On y trouve ensuite une évaluation sur les changements probables de la forêt causés par les changements climatiques au cours du 21^e siècle, d'après des scénarios d'émission de gaz à effet de serre du GIEC, et aussi une analyse des répercussions possibles sur le secteur forestier et les forêts si des mesures d'adaptation ne sont pas mises en place. La troisième section de ce rapport présente un bilan de la situation de l'adaptation dans le secteur forestier ainsi qu'une description des besoins essentiels du secteur s'il veut progresser dans la voie de l'adaptation. Parmi ces besoins, mentionnons : la sensibilisation et les débats sur ce que représentent les changements climatiques pour les objectifs de société destinés à la forêt, l'amélioration des connaissances et de l'information sur les changements climatiques et ses effets, des évaluations de la vulnérabilité, des cadres de travail et des outils ainsi que la coordination et la coopération concernant les initiatives d'adaptation. Pour relever le défi de l'adaptation, il faudra déployer des efforts soutenus pendant de nombreuses années. Le rapport se termine par une brève discussion sur les rôles que peuvent jouer les différents intervenants du secteur forestier pour contribuer à cet effort.

2. QUE SAVONS-NOUS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET DE SON INCIDENCE SUR LES FORÊTS?

Les changements climatiques auront une combinaison d'effets sur les forêts du Canada. Ils influenceront notamment sur la croissance et la succession, les incendies, les ravageurs et autres perturbations biotiques. Cela demeure toutefois un défi scientifique de taille que d'éclaircir les interactions biophysiques de systèmes complexes et de prédire leurs réactions face à un climat en évolution, et ce, à une échelle temporelle significative pour la gestion forestière. La dynamique des peuplements, les régimes de perturbation et les phénomènes climatiques

extrêmes interagissent pour créer des modèles environnementaux complexes. Par exemple, les relations entre l'âge et la composition des peuplements et les invasions du dendroctone du pin ponderosa (*Dendroctonus ponderosae* Hopkins) sont bien connues (p. ex. Shore et coll. 2000), et Gray (2008) a estimé que la composition de la forêt avait autant d'influence que le climat par rapport à la dynamique des populations de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* [Clemens])). De nouvelles recherches ont démontré les

relations spatiale et temporelle entre les divers types de perturbation et la vulnérabilité accrue des peuplements affaiblis face à celles-ci. En Ontario, Fleming et coll. (2002) ont observé que le climat exerce un contrôle statistiquement significatif sur le décalage temporel qui existe entre la défoliation causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette et les incendies ultérieurs, puisque les régions humides défoliées présentent moins de risque d'incendie que les régions sèches. Dans les Prairies, la sécheresse et la défoliation causée par la livrée des forêts (*Malacosoma disstria* Hübner) ont provoqué des baisses périodiques de la croissance des trembles (*Populus* spp.) (Hogg et coll. 2005), et les peuplements affaiblis sont plus vulnérables aux dommages imputables aux pathogènes fongiques et aux insectes perceurs du bois (Hogg et coll. 2002).

Bien que les processus de succession et de croissance soient modifiés par les changements climatiques, ces derniers changent également la vulnérabilité de la forêt aux invasions d'insectes qui en retour modifieront la charge de combustibles et les risques d'incendies. Dans le même ordre d'idées, comme les changements

climatiques influent sur la fréquence et l'intensité des incendies, ils modifieront également la vulnérabilité de la forêt aux invasions d'insectes. Les effets des facteurs individuels interagiront d'une façon complexe à l'échelle spatiale et temporelle et, en fonction du temps et de l'emplacement, ils pourront aggraver ou alléger le problème. Il est essentiel de prévoir la combinaison de ces effets si nous voulons prévoir l'effet réel des changements climatiques sur la forêt. Si nous ne tenons pas compte de cette combinaison d'effets, nous risquons d'obtenir des prévisions aussi inexactes que celles que nous obtiendrions si nous laissions de côté l'un des facteurs individuels.

Cette section présente un résumé des connaissances actuelles sur l'évolution du climat à ce jour et à venir ainsi que sur les incidences des changements climatiques sur la forêt et le secteur forestier. L'information est synthétisée pour toutes les forêts du Canada, mais est regroupée en cinq régions qui représentent les principaux types forestiers (figure 1). Nous faisons également des références aux écozones (voir la carte des écozones de l'annexe 1).

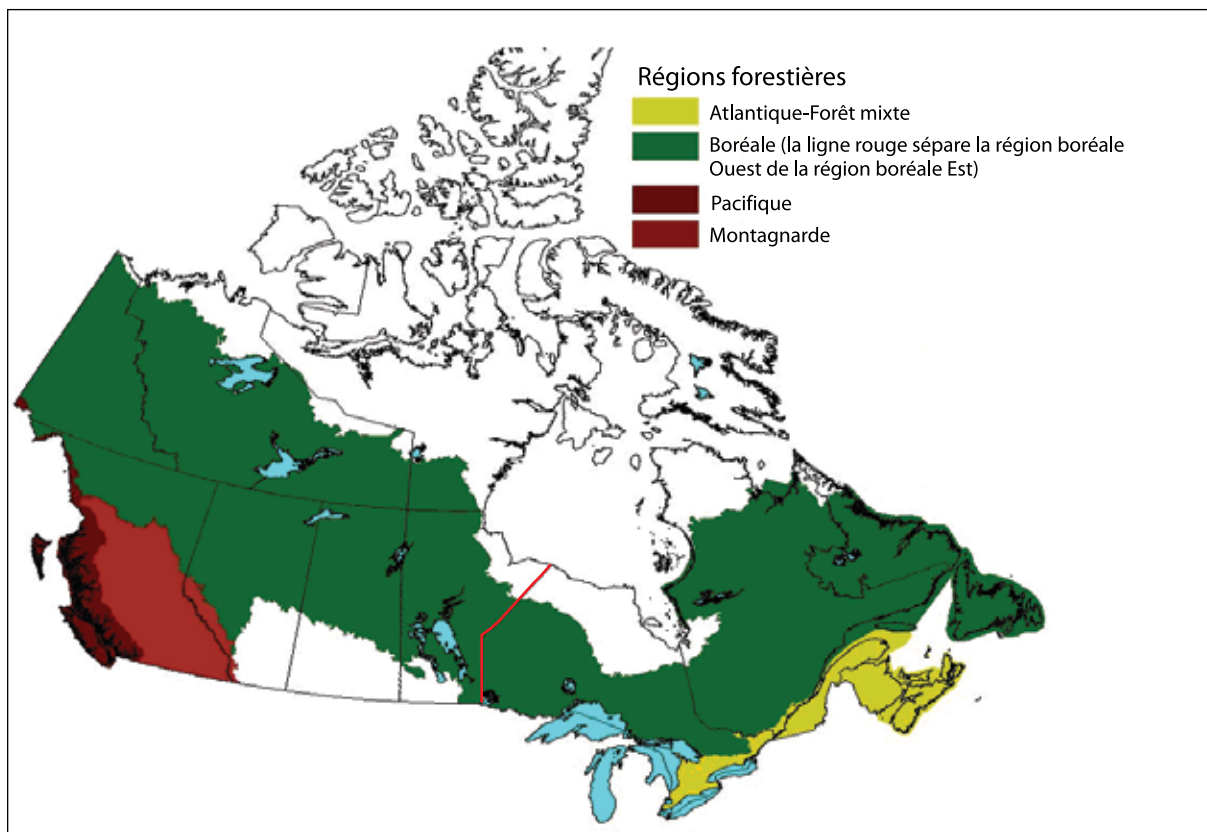


Figure 1. Régions forestières utilisées dans cette évaluation.

Lorsqu'il est approprié et possible de le faire, nous présentons des évaluations qualitatives du degré d'incertitude, basées sur des ouvrages scientifiques et sur le jugement d'experts. Compte tenu de la complexité d'évaluer les changements climatiques et ses effets possibles, et surtout de faire des prévisions à long terme, il est difficile d'évaluer le degré d'incertitude. Cependant, en le faisant, nous obtenons un contexte important. De nombreuses causes sont à l'origine de l'incertitude (voir GIEC 2005). L'une d'entre elles est l'imprévisibilité du phénomène à l'étude découlant par exemple de la complexité des interactions entre les divers facteurs contribuant au phénomène ou d'un accent mis sur les projections. Plus une projection est éloignée dans le futur, plus le degré d'incertitude s'accroît. Une deuxième cause d'incertitude est le manque de connaissances (incertitude structurelle). Il se peut que cette dernière soit la cause d'incertitude la plus difficile à évaluer, parce qu'il est difficile de saisir l'ampleur du manque de connaissances. Enfin, les prévisions, observations et résultats de modèle présentent tous généralement des inexactitudes. Nous pouvons adopter plusieurs approches pour exprimer la probabilité ou le niveau de confiance (voir GIEC 2005). Dans cette section, les évaluations de probabilité sont utilisées pour exprimer les jugements quant au degré d'incertitude, associées à une conclusion ou à une prévision : très probable (> 90 % de probabilité), probable (> 66 % de probabilité), probabilité moyenne (33 % à 66 % de probabilité) et improbable (< 33 % de probabilité).

2.1 Que se passe-t-il actuellement?

2.1.1 Comment le climat a-t-il évolué?

Les concentrations dans l'atmosphère de gaz à effet de serre ont considérablement augmenté au cours du dernier siècle, ce qui s'explique avant tout par l'utilisation humaine de combustibles fossiles et par le changement d'affectation des terres (Solomon et coll. 2007). De nombreuses études ont démontré une coïncidence de changements au cours de cette période à l'échelle mondiale et régionale. Nous présentons ici un résumé des tendances climatiques pour la période 1950–2003 pour les régions forestières du Canada.

Nous avons utilisé des modèles spatiaux décrits dans d'autres ouvrages (McKenney et coll. 2006a). En résumé, les données de stations climatologiques (température minimale, température maximale et précipitations) proviennent du Canada et des États-Unis pour la période comprise de 1950 à 2003. Le logiciel de modèle spatial (ANUSPLIN; Hutchison 2004) a servi à interpoler les données des stations climatologiques pour produire chaque mois des cartes. À partir de ces cartes illustrant les principales variables de climat, nous avons tiré 29 indices bioclimatiques annuels (voir l'annexe 2). Cinq d'entre eux se trouvent au tableau 1 du rapport : température moyenne annuelle (TAM), température maximale du mois le plus chaud (TMAXMC), température minimale du mois le plus froid (TMINMF), précipitations annuelles (PA) et degrés-jours de croissance (DJC), qui est un indice de la chaleur totale disponible aux plantes pendant la saison de croissance. Nous avons choisi ces variables à cause du rôle intégral qu'elles jouent dans les processus de liés aux écosystèmes forestiers tels que la croissance et la perturbation.

L'envergure que prennent les changements climatiques depuis 1950 a considérablement varié dans l'ensemble des régions forestières (tableau 1). Les changements de température ont été, de façon générale, plus importants à l'ouest et au nord, avec des changements radicaux dans les régions forestières boréale Ouest, montagnarde et du Pacifique. Ces régions indiquent également une forte asymétrie dans leur modèle de réchauffement, les TMINMF montant en effet beaucoup plus rapidement que les TMAXMC. Bien que les DJC soient reliés à la température, les changements dans cet indice ne montrent pas le même degré de variation régionale. Les degrés-jours représentent la somme des températures maximales pour tous les jours de plus de 5 °C; les changements radicaux de températures minimales extrêmes relevés dans trois des régions de l'Ouest, n'ont cependant pas indiqué des changements de même importance dans les DJC. C'est le modèle inverse concernant les précipitations : augmentations les plus importantes dans l'Est, peu de changement dans l'Ouest et même une diminution dans la région du Pacifique.

Tableau 1. Tendances de 5 variables climatiques pour 5 régions forestières de 1950 à 2003 (exprimées comme le changement pendant la période de 53 ans). Les valeurs pour le Canada s'appliquent à toutes les régions, pas seulement celles des forêts.

Variable climatique	Atlantique- Forêt mixte	Boréale Est	Boréale Ouest	Montagnarde	Pacifique	Canada
Température moyenne annuelle (°C/53 ans)	0,3	0,5	2,0	1,8	1,4	1,4
Température maximale pour le mois le plus chaud (°C/53 ans)	0,3	1,0	0,7	-0,5	0,2	0,7
Température minimale pour le mois le plus froid (°C/53 ans)	0,3	0,7	5,5	6,6	3,6	3,7
Précipitations annuelles (mm/53 ans)	75	75	23	-1	-108	30
Degrés-jours de croissance (unités de chaleur/53 ans)	88	121	110	106	144	118

Ces résultats sont généralement appuyés par d'autres constatations issues de documents de recherche. Zhang et coll. (2000) ont relevé des changements de température dans l'ensemble du Canada pour la période 1950-1998, dont des augmentations de 1 à 2 °C dans l'Ouest et de < 0,5 °C dans l'Est. Les taux asymétriques de réchauffement présentés pour la température maximale et la température minimale ont également été relevés dans les études précédentes (p. ex. Easterling et coll. 1997; Vincent et Mekis 2006). Comme dans le présent rapport, Zhang et coll. (2000) signalent des tendances généralement accrues de précipitations dans l'Est. Ils ont toutefois constaté une augmentation de 5 à 10 % des précipitations le long de la côte Ouest par rapport au 100 mm (ou 5 %) de diminution pour la région du Pacifique. Cette différence est difficile à expliquer, mais elle pourrait être reliée aux différences entre l'approche analytique ou l'échelle spatiale des deux recherches.

Il existe un certain nombre de sources d'incertitude dans les prévisions des tendances climatiques. Des erreurs peuvent se produire lorsqu'on interpole des données bruitées de stations climatologiques; dans ce cas-ci, les erreurs de modèle se trouvent dans une échelle de 1 à 1,5 °C pour les températures maximales et minimales et de 20 à 30 % pour les précipitations (McKenney et coll. 2006a). Fait à signaler, il existe également des erreurs dans les données

de stations météorologiques. Les thermomètres de verre que l'on utilisait autrefois avaient une précision de 0,5 °C, limitant ainsi la précision de l'interpolation. Le degré d'exactitude des thermisteurs modernes est d'environ $\pm 0,3$ °C. Le degré d'exactitude des mesures varie donc d'une station à l'autre et au fil du temps à cause du remplacement d'instruments. Même si les problèmes importants de données ont été repérés et corrigés (p. ex. erreurs de décimales), il est probable qu'il y ait toujours des erreurs associées lors de la lecture d'instruments météorologiques, surtout concernant la mesure de l'enneigement pour laquelle le pourcentage d'erreur peut monter à 50 % (Goodison 1978; Sevruk 1982). Les biais des données climatiques qui se produisent systématiquement, varient au fil du temps et apportent un élément de confusion dans les analyses de tendances. Parmi ces erreurs, on trouve les changements liés aux heures d'observation quotidienne, à l'emplacement de la station climatologique et aux augmentations de température attribuables à l'urbanisation croissante près de la station. Même si les données présentées dans ce rapport ont été vérifiées de près, il est possible que certaines stations aient quand même des biais temporels. Étant donné le grand nombre de stations utilisées, la fiabilité des modèles spatiaux et la concordance générale entre les tendances que nous présentons et celles qui se trouvent dans d'autres ouvrages, notre niveau de confiance est de moyen à élevé concernant

les tendances présentées dans ce rapport. Nos modèles utilisent toutes les données disponibles de stations (sauf les erreurs évidentes) pour améliorer la couverture spatiale, alors que certaines des données déjà mentionnées utilisaient des données issues de bien moins de stations. Il existe un compromis entre la couverture spatiale et la fidélité des données.

Par ailleurs, les extrêmes climatiques influent aussi grandement sur les écosystèmes. Il existe deux types d'extrêmes climatiques (Easterling et coll. 2000) : 1) les extrêmes de statistiques climatiques qui ont lieu chaque année comme les températures extrêmes et les précipitations (y compris celles qui ont lieu au cours du mois ou de l'année comme une température quotidienne très basse ou très élevée et une quantité quotidienne élevée de précipitations), et 2) des épisodes extrêmes comme une sécheresse, des inondations ou des ouragans qui ne se produisent pas toujours chaque année à un endroit donné. Le reste de cette section présente une analyse des changements liés aux extrêmes de statistiques climatiques (le premier type d'extrêmes climatiques), qui sont plus faciles à relever que les changements liés aux épisodes extrêmes puisqu'ils posent un défi pour les analyses de tendances en raison de leur variabilité spatiale et temporelle. Les épisodes extrêmes constituent ceux allant au-delà de 90 centiles.

Au cours du dernier siècle, la grande partie du sud du Canada a connu des tendances d'augmentation significative de la température quotidienne minimale et maximale (Bonsal et coll. 2001; Vincent et Mekis 2006). Plus précisément, on voit une diminution du nombre de jours ayant des températures extrêmement basses en hiver, au printemps et en été, alors que le nombre de jours ayant des températures extrêmement élevées en hiver et au printemps a augmenté (la tendance du nombre de journées chaudes d'été n'importe pas à l'échelle nationale). Comme nous l'avons précédemment mentionné, ce changement d'extrêmes est asymétrique et comprend des valeurs centiles basses qui augmentent plus que les valeurs élevées. Durant la même période, le nombre maximal de jours consécutifs secs diminue, alors que le nombre de jours à fortes précipitations augmente. Nous n'avons cependant pas observé de changements

uniformes concernant l'intensité moyenne des précipitations. Ces tendances nationales sont également valables pour la période 1950–2003, pour laquelle nous disposons d'un ensemble de données plus vaste, surtout pour le nord du Canada.

Dans un pays aussi grand et aussi diversifié que le Canada, les tendances climatiques nationales peuvent être très différentes de celles des régions. L'analyse des données météorologiques des stations nordiques de la deuxième moitié du 20^e siècle souligne des tendances différentes par exemple concernant les précipitations extrêmes. En effet, pour la période 1940–1995, un sous-groupe de 38 stations météorologiques dans le nord du Canada affichait une tendance d'augmentations marquées dans la portion de précipitations annuelles faisant principalement partie du 10 % d'épisodes, alors que pour la période 1910–1995, 30 stations dans le sud du pays indiquaient une tendance négative. Une des tendances qui varie aussi selon la région est la tendance à la hausse du nombre de fortes pluies printanières dans l'est du Canada (Zhang et coll. 2001).

Il est compliqué de dépister les changements, car la variabilité saisonnière de fréquence et d'ampleur des extrêmes prédomine souvent les tendances à long terme. Par exemple, les pluies torrentielles en été étaient généralement plus courantes au début du 20^e siècle et étaient relativement rares dans les années 1930; depuis 1950, il y a eu peu de changements dans la fréquence de ces pluies. De façon générale, il existe peu d'analyses d'extrêmes climatiques qui associent les tendances régionales et saisonnières.

2.1.2 Quelles sont les incidences sur la forêt?

Un principe fondamental de gestion forestière est que les variables climatiques influent sur la croissance et la dynamique des peuplements forestiers (MaIver et coll. 1989). Plus précisément, les peuplements forestiers réagissent à la fois aux conditions extrêmes et moyennes qui caractérisent un régime climatique donné. De même, les régimes de perturbation, associés de près à leurs facteurs de contrôle climatique, exercent une influence importante sur les dynamiques de paysages

forestiers (Fleming 2000). Pour le moment, l'indication la plus évidente de l'effet dévastateur des changements climatiques sur la forêt est l'augmentation de la gravité des incendies et l'invasion anormale de ravageurs par rapport au passé. Les changements liés à la croissance, à la phénologie et à la dynamique des peuplements demeurent moins clairs. Cette section présente un bilan des connaissances actuelles sur les effets récents des changements climatiques sur les forêts du Canada.

2.1.2.1 Incendies et perturbations biotiques

L'incendie constitue le principal agent de renouvellement de la majorité de la forêt du Canada et influe grandement sur la structure et la fonction des forêts. À l'heure actuelle, on estime que plus de 2 millions d'hectares en moyenne brûlent chaque année au Canada (Stocks et coll. 2002). Quatre facteurs influent fortement sur les incendies : le temps (les conditions météorologiques), les combustibles, les agents d'allumage et les activités humaines. Le récent réchauffement climatique a probablement eu un impact rapide et profond sur les incendies de la forêt boréale (Weber et Flannigan 1997; Soja et coll. 2006). Gillett et coll. (2004) ont utilisé un modèle climatique couplé global (un modèle qui simule les processus océaniques et atmosphériques, leurs interactions et leurs effets sur le climat), pour montrer que l'augmentation des brûlis au Canada durant les 40 dernières années découle des changements climatiques d'origine humaine. De plus, il semble que la température représente le plus important paramètre de prévision des brûlis au Canada; en effet, plus la température est élevée, plus grande est la superficie des brûlis (Flannigan et coll. 2005).

La tendance à la hausse concernant les superficies brûlées chaque année causées par les incendies au Canada depuis le début des années 1970 est sans équivoque, avec une augmentation à la fois du nombre d'incendies causés par la foudre ainsi que de la superficie moyenne de brûlis par incendie. Trois des quatre plus importantes saisons des feux jamais enregistrées au Canada (en termes de superficie brûlée) ont eu lieu entre 1989 et 1998 (Stocks et coll. 2002). De nos jours, la foudre provoque plus d'incendies en fin de saison des feux que dans le passé, correspondant à la prolongation

de la durée de la saison des feux. La tendance est généralement la même partout au pays, mais est plus prononcée dans les écozones occidentales de la taïga et du Bouclier boréal (Produr et coll. 2002; Kasischke et Turesky 2006).

Le temps (et sa représentation à long terme comme climat) est probablement le plus important facteur influant sur la superficie brûlée. Le temps, par l'intermédiaire de l'humidité relative, du vent et des précipitations, influe sur la teneur en humidité du combustible qui détermine directement si les combustibles s'enflammeront et, s'ils s'enflamment, si le feu s'étendra. De même, le temps influence l'activité orageuse qui est l'agent d'allumage responsable de la plupart des brûlis au Canada (Stocks et coll. 2002). Les températures printanières et estivales ainsi que le nombre consécutif de jours secs, sont les éléments climatiques les plus directs et déclencheurs de feux de forêt (Flannigan et Harrington 1988; Flannigan et Van Wagner 1991). Depuis toujours l'occurrence des feux et les brûlis ont eu une relation significative du point de vue statistique avec les épisodes de sécheresse estivale (Girardin et coll. 2006). Par ailleurs, la variabilité liée aux superficies brûlées s'explique surtout par les variations récentes dans les températures moyennes mensuelles durant la saison des feux, correspondant à l'idée que les changements climatiques d'origine humaine favorisent les incendies (Gillett et coll. 2004).

Les reconstructions historiques et les études de modélisation révèlent que la récente tendance à la hausse des incendies correspond aux signes précurseurs des effets des changements climatiques (Girardin et coll. 2007). Fait à noter, le Canada a néanmoins connu dans son passé plusieurs périodes comprenant beaucoup plus d'incendies que récemment. En établissant une comparaison avec les 200 dernières années, on remarque que les données de la deuxième moitié du 20^e siècle montrent relativement peu d'occurrences d'incendie (Girardin et coll. 2006). En plus de l'effet du temps et du climat sur la fréquence des incendies et les superficies brûlées, d'autres facteurs ajouteront sur de longues périodes leurs propres effets, notamment l'ampleur et la technologie en matière de la lutte contre les incendies, la gestion des terres et les sources d'incendie (Produr et coll. 2002).

Au Canada, on croit généralement que les forêts très humides de l'Est ont toujours été plus sensibles aux invasions à grande échelle de ravageurs comme la tordeuse des bourgeons de l'épinette (Fleming 2000). On voit pourtant récemment des épidémies sans précédent d'insectes dans l'Ouest canadien comme le dendroctone du pin ponderosa en Colombie-Britannique et en Alberta, le dendroctone de l'épinette au Yukon et la brûlure en bandes rouges par le *Dothistroma* dans le nord-ouest de la Colombie-Britannique. Même si l'envergure de ces épidémies est variable, leur ampleur dépasse celle des épidémies antérieures causées par chacun de ces insectes; elles ont touché des espèces indigènes ou des résidents à long terme dans les régions où l'invasion a débuté; elles sont associées au franchissement du seuil climatique en termes de précipitations estivales (Woods et coll. 2005) ou de températures hivernales (Carroll et coll. 2004). Les changements de statut de ces ravageurs attribuables au climat accroissent grandement l'incertitude quant aux futurs régimes de perturbation causés par les insectes et aux modèles de destruction qu'ils produiront dans des conditions de climat en évolution (Fleming 2000).

2.1.2.2 Réaction des peuplements forestiers — croissance

À ce jour, nous avons fait peu de généralisations sur l'effet des réactions combinées de la croissance forestière sur les changements climatiques et d'autres changements d'origine humaine tels que l'augmentation dans l'atmosphère de concentrations de dioxyde de carbone (CO₂) et de dépôts d'azote. Malgré des indications antérieures qui avançaient que de tels changements devraient augmenter la productivité forestière, nous n'avons pas décelé de changements importants dans les données d'analyse de mesurage de surface forestière dans la partie est des États-Unis (Caspersen et coll. 2000) et dans les forêts boréales (Lloyd et Bunn 2007). Au Canada, les résultats préliminaires d'une étude en cours sur les anneaux de croissance des arbres menée par le Service canadien des forêts de Ressources naturelles Canada (Bouriaud et coll. 2007)¹ portent à croire qu'il existait une tendance constante d'accélération de croissance dans les forêts

du Canada avant les années 1940, mais que depuis ce temps les tendances de croissance ont beaucoup varié selon la région et le type de forêts. Cependant, il est probable que les réactions de croissance locale et régionale face à un climat en évolution dépendent d'essences propres à un site et de la dynamique de peuplements (Hogg et Bernier 2005). Par exemple, dans un endroit situé au nord et un autre au sud dans la forêt boréale Ouest, la réaction de croissance annuelle de l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] BSP) a été positive face au temps plus froid et humide, alors que la réaction de croissance positive du pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) a été associée aux températures plus élevées et aux précipitations printanières (Brooks et coll. 1998).

Les résultats du projet d'enrichissement en gaz carbonique à l'air libre aux États-Unis et en Europe indiquent que la productivité forestière et la résistance à la sécheresse devraient généralement avoir une réponse positive aux augmentations de concentrations de CO₂ atmosphérique, présentant une augmentation moyenne de croissance de 23 % lorsque la concentration atmosphérique double (à partir de niveaux préindustriels à environ 550 parties par milliard (ppb ou $\times 10^{-9}$); la concentration actuelle est d'environ de 385 parties par milliard) (Norby et coll. 2005). Cependant, notre aptitude à extrapoler ces résultats pour déterminer le taux de croissance des écosystèmes forestiers du Canada est sérieusement restreinte en raison du manque de preuves tangibles, puisque nous ne comprenons pas entièrement comment un tel taux peut être modifié par d'autres facteurs qui limitent la croissance et par des processus physiologiques. Ces facteurs limitants peuvent être des interactions compétitives pour les ressources des écosystèmes, surtout pour l'azote dans les peuplements mûrs (Reich et coll. 2006), des changements d'emplacements pour les arbres mûrs (p. ex. Körner et coll. 2005) et des dérèglements de photosynthèse (Medlyn et coll. 1999; Reich et coll. 2006). Dans ce contexte, on peut définir les dérèglements comme un recul aux anciens taux de rendement photosynthétique lorsque les arbres s'adaptent de façon biochimique au nouvel environnement. L'interaction entre ces facteurs limitants de croissance et les changements climatiques

¹Bouriaud, O.; Bhatti, J.; Kurz, W.; Hogg, T. 2007. Temporal and spatial growth patterns of Canadian forests – preliminary analysis Canadian Research on Enhancement of Greenhouse Gas Sinks Final PERD POL .6.2 Workshop February 21:23-2007 Salle Camsell, Ottawa (Ont.).

pourrait faire en sorte que certaines contraintes soient éliminées dans un grand nombre de forêts canadiennes, puisque des conditions plus chaudes et plus sèches favoriseront la minéralisation plus rapide de l'azote organique qui est emprisonné dans les sols humides et froids, mais ceci n'est qu'une hypothèse.

Les progrès technologiques liés à la télédétection par satellite ont rendu possible la surveillance à l'échelle mondiale et l'évaluation des changements de productivité forestière selon des capteurs de « verdure » multispectraux, bien qu'il reste d'importants défis dans le domaine de la validation de ces capteurs à grande échelle par rapport aux mesures prises sur le terrain. Les résultats issus d'anciens rapports sur la surveillance par satellite ont révélé des augmentations de l'ampleur et de la durée selon « l'indice de verdure » de la saison de croissance des régions forestières nordiques durant la période 1981–1999 (p. ex. Zhou et coll. 2001). On se sert désormais de cette approche en conjonction avec les modèles pour conclure à un effet positif du réchauffement sur la productivité de la toundra dans les régions arctiques, mais peu de changement pour les régions boréales jusqu'à l'an 2000 (Bunn et coll. 2005). Cependant, des observations plus récentes indiquent une tendance à la baisse de la productivité de la forêt boréale au Canada (Goetz et coll. 2005), surtout entre 2001 et 2004, lorsque les sécheresses sévissaient sur de grandes étendues de la forêt boréale en Amérique du Nord et en Eurasie (Bunn et coll. 2007). Ces résultats correspondent aux observations au sol de l'étude sur les impacts des changements climatiques sur la productivité et la santé des peupliers faux-trembles (CIPHA), menée par le Service canadien des forêts (Hogg et coll. 2005) qui a récemment étayé les effets de la sécheresse de 2001–2002 sur les tremblaies dans le centre-ouest de l'intérieur du Canada (Hogg et coll. 2008). Ces effets comprennent une diminution de la productivité à l'échelle régionale et une augmentation de la mortalité du tremble, surtout dans les régions les plus touchées par la sécheresse.

De grandes surfaces de la région forestière Atlantique-Forêt mixte, comme la région forestière acadienne, s'apparentant à des écotones, composées surtout d'essences boréales à la limite sud de leur aire et d'essences

tempérées à la limite nord de leur aire; cette caractéristique rend cette région forestière particulièrement sensible aux changements climatiques. Les résultats de l'étude nationale sur les anneaux de croissance des arbres (Bouriaud et coll. 2007) indiquent que la plupart des essences de cette région réagissent bien aux changements climatiques qui ont eu lieu à ce jour, mais selon un certain nombre d'indications, cette tendance ne durera pas. Au cours des dernières années, plusieurs ravageurs comme le puceron lanigère du sapin (*Adelges piceae* Ratzeburg), et la spongieuse (*Lymantria dispar* L.) ont causé plus de dommages que dans le passé dans les Maritimes, surtout dans les régions plus froides. De plus, il existe des indications de la diminution de croissance du sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill) dans le sud du Nouveau-Brunswick sans doute à cause des conditions de sécheresse.

Grâce à des études dans les régions forestières sensibles au climat et bien délimitées, on a mieux réussi à cerner les changements d'origine climatique sur les arbres ou sur la dynamique des peuplements et mieux démontré les réactions probables aux changements climatiques à l'échelle locale et régionale. Comme nous l'avons mentionné précédemment, les conclusions de récentes études ont démontré la vulnérabilité du tremble face à la sécheresse dans les Prairies (Hogg et coll. 2005) et le délai exceptionnellement long concernant la régénération après incendie des peuplements mixtes au Yukon (Hogg et Wein 2005). Au Yukon, la régénération après incendie et la régénération de forêts mixtes dans la deuxième moitié du 20^e siècle a été beaucoup plus lente que prévu (Hogg et Wein 2005). La limite forestière constitue aussi un élément sensible au climat. D'ailleurs, le port des épinettes (*Picea* spp.) à la limite septentrionale des arbres de l'Est du Canada est graduellement passé durant le siècle dernier de procombrant à dressé dans divers endroits très au nord (Gamache et Payette, 2004). De plus, au cours du siècle dernier, les peuplements d'épinettes blanches (*Picea glauca* [Moench] Voss) et de saules (*Salix* spp.) de l'Ouest du Canada situés à limite forestière subarctique ont réagi au réchauffement climatique soit en présentant une densité accrue ou en se propageant pour la première fois au-delà de leur limite forestière (Danby et Hik 2007). Enfin, on associe au

réchauffement climatique le déclin à long terme du cyprès jaune (*Chamaecyparis nootkatensis* [D. Don] Spach) en Alaska et le long de la côte nord du Pacifique de la Colombie-Britannique (Hennon et coll. 2006). Plus précisément, la diminution de la couverture de neige en hiver a causé davantage de gelures des racines superficielles du cyprès jaune, provoquant un dépérissement terminal de la forêt à grande échelle. Donc, même si on détecte chez les peuplements sensibles une réaction au climat, la direction et l'ampleur de cette réaction ainsi que les facteurs déterminants varient.

2.1.2.3 Réaction du peuplement forestier — phénologie et dynamique des peuplements

En ce qui a trait à la phénologie, le climat influe énormément sur la croissance, plus précisément sur le débourrement et la défeuillaison des essences feuillues, qui marquent le début et la fin de la saison de croissance. Le climat agit aussi d'une façon subtile, mais non moins importante, sur la physiologie du feuillage des conifères. En général, les dates de débourrement varient beaucoup plus que les dates de la défeuillaison, et parce que la hauteur du soleil est plus élevée et que les rayons solaires sont plus forts au printemps, les printemps précoces ont beaucoup plus d'impact sur la croissance annuelle que les automnes tardifs. Les changements liés à la phénologie des essences et à la répartition témoignent d'une réaction au climat. Même si la tendance au réchauffement que l'on observe partout au Canada a déjà dû influencer sur la phénologie, les observations actuelles sont dispersées et insuffisantes pour appuyer toute généralisation, surtout étant donné la variabilité naturelle du phénomène. Par exemple, en utilisant un modèle empirique de débourrement exprimé en degré-jour, Colombo (1998) a estimé la tendance d'un débourrement précoce chez l'épinette blanche dans seulement 5 à 10 endroits au Canada, la plupart des augmentations se situant dans la plage de variabilité historique des dates de débourrement. Puisque les petits changements sont difficiles à détecter dans un contexte de large degré de variabilité naturelle, notre évaluation générale est qu'il est très probable que les changements climatiques ont eu une incidence sur la phénologie, mais que

cette incidence n'a pas encore été observée et consignée.

Raulier et Bernier (2000) ont réalisé un modèle fondé sur le climat du débourrement pour l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.). Dans leur ouvrage, on a documenté la très grande variabilité interannuelle de ce phénomène, jusqu'à 20 jours pour des années consécutives, ce qui pourrait renfermer des tendances à long terme. Une analyse non publiée² qui utilise ce modèle suggère un avancement graduel des dates de débourrement de 4 à 10 jours au cours du siècle dernier. Ce résultat concorde avec l'avancement observé du débourrement printanier allant de 2 à 8 jours pour les plantes ligneuses vivaces comme le lilas (*Syringa* spp.) et les vignes ornementales (*Vitis vinifera*) dans le nord-est des États-Unis de 1965 à 2001 (Wolfe et coll. 2005). Des résultats issus de certaines des meilleures recherches au Canada sur ce sujet, dont celles de Beaubien et Freeland (2000), ont indiqué un changement de 26 jours par rapport à la date de floraison du peuplier faux-tremble dans la région d'Edmonton au cours du siècle dernier.

2.2 Quels seront les changements climatiques à venir?

2.2.1 Projection du climat futur

De nombreux chercheurs ont utilisé les modèles de circulation générale (MCG) dans leurs études pour simuler le climat à venir; ces modèles comprennent des représentations tridimensionnelles de l'atmosphère, des océans, de la cryosphère ainsi que de la surface terrestre et des paramétrages des processus physiques qui s'y rattachent. Les scénarios de climats futurs reposent sur les effets sur le système Terre-atmosphère des différentes concentrations de gaz à effet de serre et d'autres polluants présents dans l'atmosphère. Les MCG fournissent des simulations transitoires qui permettent l'étude des taux de changements climatiques possibles dans le prochain siècle.

Dans le présent rapport, des projections climatiques ont été générées pour trois périodes à l'aide de données provenant de quatre MCG. Il s'agit du MCG canadien (MCCG2; Boer et coll. 2000 <http://www.cccma.ec.gc.ca/french/>

²Analyse non publiée dirigée par P.Y. Bernier du Service canadien des forêts.

models/cgcm2.shtml); la troisième génération du modèle couplé du centre Hadley au Royaume-Uni (HadCM3; Gordon et coll. 2000); le MCG du Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation en Australie (CSIRO Mk2; Gordon et O'Farrell 1997) et le modèle climatique parallèle MCG du National Center for Atmospheric Research des États-Unis (NCAR; <http://www.cgd.ucar.edu/pcm/>). À moins d'indication contraire, les résultats présentés dans ce rapport sont une moyenne des données des quatre MCG.

Pour chaque MCG, nous avons utilisé deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre anthropique à l'échelle mondiale, soit A2 et B2, comme le décrivent Nakicenovic et Swart (2000) et le GIEC dans son quatrième rapport d'évaluation (voir Metz et coll. 2007, Parry et coll. 2007, et Solomon et coll. 2007). Aucun de ces scénarios n'inclut les nouveaux efforts mondiaux consacrés à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ces scénarios sont différents puisque comparativement au scénario B2, dans le scénario A2, on présume qu'il y aura une croissance démographique plus élevée, une plus faible convergence des revenus dans l'ensemble des pays et des régions, une réduction des terres forestières, davantage de pollution, une plus grande intensité énergétique et une plus grande dépendance envers les combustibles fossiles.

Selon le scénario A2, on s'attend à ce que les émissions augmentent jusqu'à 140 gigatonnes (milliards de tonnes) d'équivalent- CO_2 par an (Gt éq. CO_2 /an) d'ici 2100; par comparaison les émissions en 2000 étaient d'environ 40 Gt éq. CO_2 /an (Metz et coll. 2007). L'équivalent- CO_2 est une mesure du montant de CO_2 , par rapport à une quantité donnée d'émission de gaz à effet de serre, qui aurait le même effet de réchauffement mondial pour une période de 100 ans. Dans ce scénario, la meilleure projection du GIEC est que la température moyenne de la surface de la Terre devrait augmenter de 3,4 °C durant les périodes 1980–1999 et 2090–2099 (fourchette probable de 2 à 5,4 °C) (Solomon et coll. 2007). Selon le scénario B2, on prévoit des augmentations d'émissions jusqu'à 70 Gt éq. CO_2 /an d'ici 2100 (Metz et coll. 2007), avec une hausse de température de 2,4 °C (1,4 à 3,4 °C) (Solomon et coll. 2007). Pour les deux scénarios, on prévoit un réchauffement plus prononcé sur les terres, aux latitudes boréales polaires — là où se situent les forêts canadiennes.

Le GIEC considère que les scénarios A2 et B2 et les quatre autres qu'il utilise sont tous possibles (Nakicenovic et Swart 2000; Solomon et coll. 2007). Nous avons choisi les scénarios A2 et B2 parce que nous pensons qu'ils représentent les modèles mondiaux plausibles d'émissions de gaz allant de bas à moyen (B2) à élevé (A2), pour le prochain siècle, si aucune mesure de réduction n'est prise dans le monde entier. Même si le scénario A2 semble extrême, les données actuelles laissent entendre que les émissions de CO_2 ont augmenté à un taux plus rapide que celui prévu par le scénario le plus pessimiste du GIEC (Canadell et coll. 2007). Les émissions de CO_2 provenant des combustibles fossiles et du ciment ont augmenté de 3,3 % par an entre 2000 et 2006, comparativement à 1,3 % par an dans les années 1990; même si cette tendance se poursuit, le scénario A2 serait modéré.

Il est cependant important de garder à l'esprit que les scénarios utilisés dans cette étude ne prennent pas en compte le rôle que pourraient jouer les mesures internationales de réduction d'émissions de gaz dans les prochaines décennies. L'une des manières d'évaluer les conséquences de telles mesures est d'examiner le scénario d'émissions B1 du GIEC. Le scénario B1 décrit un monde où la population atteindra son sommet vers le milieu du siècle pour ensuite décliner (la population mondiale en 2100 est inférieure dans ce scénario que dans A2 ou B2), et où la structure économique connaîtra un virage rapide vers une économie de services et d'information, ce qui fait que l'intensité d'énergie est plus basse que celle des scénarios A2 et B2. Par ailleurs, le scénario B1 assume une augmentation relativement rapide des technologies propres et écoénergétiques et une utilisation élevée de sources d'énergie non fossile, même si cela ne découle pas de nouvelles mesures visant précisément à aborder l'enjeu des changements climatiques (Nakicenovic et Swart 2000; Solomon et coll. 2007). Selon ce scénario, les émissions de gaz à effet de serre en 2100 seraient d'environ 25 milliards de tonnes d'équivalent- CO_2 par an ou environ 40 % de moins qu'en 2000 (Metz et coll. 2007). Malgré ces mesures, dans le scénario B1, la température mondiale augmenterait quand même d'ici la fin du siècle de 1,8 °C au-dessus de la moyenne entre 1980 et 1999 (fourchette probable de 1,1 à 2,9 °C) (Solomon et coll. 2007). Les augmentations de température pourraient

être supérieures dans les terres forestières du Canada. Le GIEC (Parry et coll. 2007) suggère qu'une augmentation de cette ampleur, bien que plus faible que les augmentations examinées en détail dans ce rapport, provoquerait néanmoins un bouleversement de l'écosystème mondial, y compris le risque accru de disparitions d'espèces, davantage de déplacement et de migration d'espèces, et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité d'incendies. Il sera donc encore important de prendre des mesures d'adaptation pour le secteur forestier.

2.2.2 Projections du climat futur dans les forêts canadiennes

Pour établir les grilles du climat futur, nous avons généré des surfaces de moyenne de changement pour chaque période (2011–2040, 2041–2070, 2071–2100) en interpolant les changements prévus par chaque MCG et chaque scénario d'émissions (McKenney et coll. 2006b). Nous avons ensuite ajouté ces prévisions de changements aux normales de station climatique pour les années 1971 à 2000, et ces valeurs ajustées de station ont servi à établir les grilles climatiques définitives. Ainsi, les résultats représentent la climatologie canadienne et américaine tel que fourni par le réseau actuel de stations climatiques en conjonction avec la moyenne de changements à grande échelle prévue par les scénarios de changements climatiques. Comme à la section 2.1.1 et au tableau 1, nous nous concentrons sur la MAT, TMAXMC, TMINFM, PA et les DJC. Nous examinons également le taux d'humidité à l'aide de l'indice d'humidité climatique décrit ci-dessous. Nous n'examinons ici que les changements prévus en 2100, mais le climat continuera à changer bien au-delà de cette année.

Les changements prévus dans la MAT et la TMAXMC sont relativement conformes dans l'ensemble des régions, puisqu'on prévoit des augmentations de température de 1 à 2 °C à court terme et de 4 à 5 °C d'ici la fin du siècle (tableau 2). Les changements sont plus variables pour la TMINFM, allant de l'augmentation prévue d'environ 8 °C pour la région boréale Est à une augmentation de seulement 3 °C pour la région du Pacifique d'ici la fin du siècle. Pour toutes les variables de température, les changements prévus dans le scénario B2 étaient de 1 à 2 °C inférieurs à ceux dans le scénario A2, ce qui

reflète le niveau plus bas d'émissions de gaz associées à ce scénario. Selon le scénario A2, la région Atlantique-Forêt mixte devrait connaître une augmentation d'environ 1000 degrés-jours d'ici la fin du siècle; toutes les autres régions devraient avoir une augmentation de 500 à 700 degrés-jours pendant cette même période. Pour toutes les régions, on s'attend selon le scénario B2 que les augmentations prévues soient plus basses d'environ 200 degrés-jours comparativement au scénario A2.

La figure 2 illustre un exemple de précisions temporelles et spatiales concernant les projections de changements liés aux températures moyennes annuelles. Cette série chronologique de cartes indique, selon les projections du MCG canadien et le scénario A2, le changement prévu de la température moyenne annuelle dans un avenir proche (2011–2040), à moyen terme (2041–2070) et à long terme (2071–2100). Selon ces projections, il sera courant d'observer des augmentations de 3 à 5 °C dans l'ensemble des régions forestières du Canada. Un autre scénario d'émissions ou un autre MCG donnerait différentes prévisions de changements ainsi que de variations temporelles et spatiales. Cependant, comme dans la figure 2, les différentes projections semblent toutes s'accorder pour montrer que les plus grands changements auraient lieu dans le nord du Canada et dans les Prairies.

Selon le scénario A2, les précipitations annuelles devraient augmenter dans toutes les régions au cours du siècle, la hausse variant de 6 % dans la région Atlantique-Forêt mixte à 17 % dans la région boréale Ouest. Par ailleurs, dans le scénario B2 on prévoit des changements de précipitations de seulement 1 à 2 % inférieurs à ceux prévus dans le scénario A2. Fait à noter, l'augmentation des précipitations ne génère pas forcément des conditions humides, puisque des températures élevées entraînent davantage d'évaporation et de transpiration (que l'on appelle évapotranspiration). Par exemple, les régions semi-arides et sans arbres du sud de l'Alberta reçoivent actuellement plus de précipitations (350 à 400 mm) que les zones boisées près de Yellowknife, Inuvik et Whitehorse (260 à 300 mm par an). Malgré leur faible taux de précipitations annuelles, ces régions nordiques sont beaucoup plus humides (propices aux

Tableau 2. Estimations des variables climatiques actuelles et projections de celles du futur pour les régions forestières du Canada. Les projections proviennent de la moyenne des données de 4 modèles climatiques globaux pour les scénarios A2 et B2^a d'émissions de gaz à effet de serre du GIEC. Les valeurs pour le Canada se fondent sur l'ensemble du pays et pas seulement les régions forestières.

Période	Atlantique-Forêt mixte		Boréale Est		Boréale Ouest		Montagnarde		Pacifique		Canada	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Température moyenne annuelle (°C)												
1961-1990	4,9	4,9	-1,6	-1,6	-4,6	-4,6	1,2	1,2	3,8	3,8	-2,4	-2,4
2011-2040	6,2	6,5	-0,1	0,1	-3,2	-2,9	2,2	2,6	4,7	5,1	-1,0	-0,7
2041-2070	7,6	7,3	1,4	1,1	-1,8	-2,1	3,5	3,3	5,9	5,7	0,5	0,1
2071-2100	9,6	8,4	3,7	2,2	0,3	-1,0	5,3	4,3	7,5	6,6	2,6	1,3
Température maximale pour le mois le plus chaud (°C)												
1961-1990	24,7	24,7	20,6	20,6	20,5	20,5	19,5	19,5	17,7	17,7	20,8	20,8
2011-2040	26,1	26,3	21,9	22,2	21,4	21,8	20,9	21,3	18,9	19,3	22,0	22,3
2041-2070	27,3	27,2	23,3	23,2	22,9	22,4	22,5	22,3	20,4	20,0	23,5	23,2
2071-2100	29,4	28,1	25,4	24,1	24,6	23,4	24,5	23,2	21,8	20,8	25,4	24,1
Température minimale pour le mois le plus froid (°C)												
1961-1990	-15,1	-15,1	-25,7	-25,7	-29,8	-29,8	-15,1	-15,1	-7,0	-7,0	-26,1	-26,1
2011-2040	-13,8	-13,3	-23,7	-23,1	-28,7	-28,1	-14,7	-13,3	-6,9	-5,7	-24,8	-24,1
2041-2070	-11,3	-12,0	-20,8	-21,6	-26,3	-27,6	-12,7	-14,4	-5,3	-6,7	-22,2	-23,4
2071-2100	-9,2	-10,3	-17,9	-19,6	-23,3	-25,3	-10,7	-11,4	-3,5	-4,3	-19,4	-21,1
Degrés-jours pendant la saison de croissance^b												
1961-1990	1502	1502	792	792	725	725	638	638	752	752	807	807
2011-2040	1770	1826	991	1034	889	920	802	834	916	957	992	1029
2041-2070	2030	1989	1198	1156	1077	1038	1004	985	1136	1101	1195	1157
2071-2100	2476	2192	1553	1319	1346	1167	1300	1116	1444	1251	1511	1302

Tableau 2. suite

Période	Atlantique-Forêt mixte		Boréale Est		Boréale Ouest		Montagnarde		Pacifique		Canada	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Précipitations annuelles (mm)												
1961-1990	1107	1107	842	842	407	407	726	726	1799	1799	616	616
2011-2040	1132	1134	878	880	430	431	746	752	1795	1826	642	644
2041-2070	1170	1160	901	901	448	447	769	757	1830	1809	662	660
2071-2100	1171	1166	935	918	476	464	789	780	1906	1864	690	677
Indice d'humidité^c (cm)												
1961-1990	66,5	66,5	55,8	55,8	13,1	13,1	37,4	37,4	145,0	145,0	31,3	31,3
2011-2040	64,2	63,3	55,8	55,1	12,7	12,1	35,4	35,4	145,0	147,4	30,9	30,1
2041-2070	63,2	62,8	54,1	54,7	10,9	11,7	32,5	31,7	144,0	142,7	28,8	29,2
2071-2100	54,5	59,3	50,8	53,4	8,2	11,0	27,1	31,0	146,1	145,4	25,3	28,2

^aScénarios d'émissions : A2 = scénario ayant une économie mondiale à l'échelle régionale où le taux d'augmentation d'émissions de gaz à effet de serre est comparable à celui des années 1990. B2 = scénario ayant une économie mondiale à l'échelle régionale où les sociétés sont plus sensibles dans le domaine social et de l'environnement que dans le scénario A2, affichant une croissance de population plus lente, une utilisation de l'énergie inférieure et une dépendance moins élevée sur les combustibles fossiles ce qui se traduit par un taux plus bas de l'augmentation d'émissions de gaz à effet de serre.

^bIndicateur de la chaleur totale disponible pour les plantes pendant la saison de croissance.

^cMesure du niveau d'humidité disponible pour les plantes pendant l'année. Une réduction indique moins d'humidité.

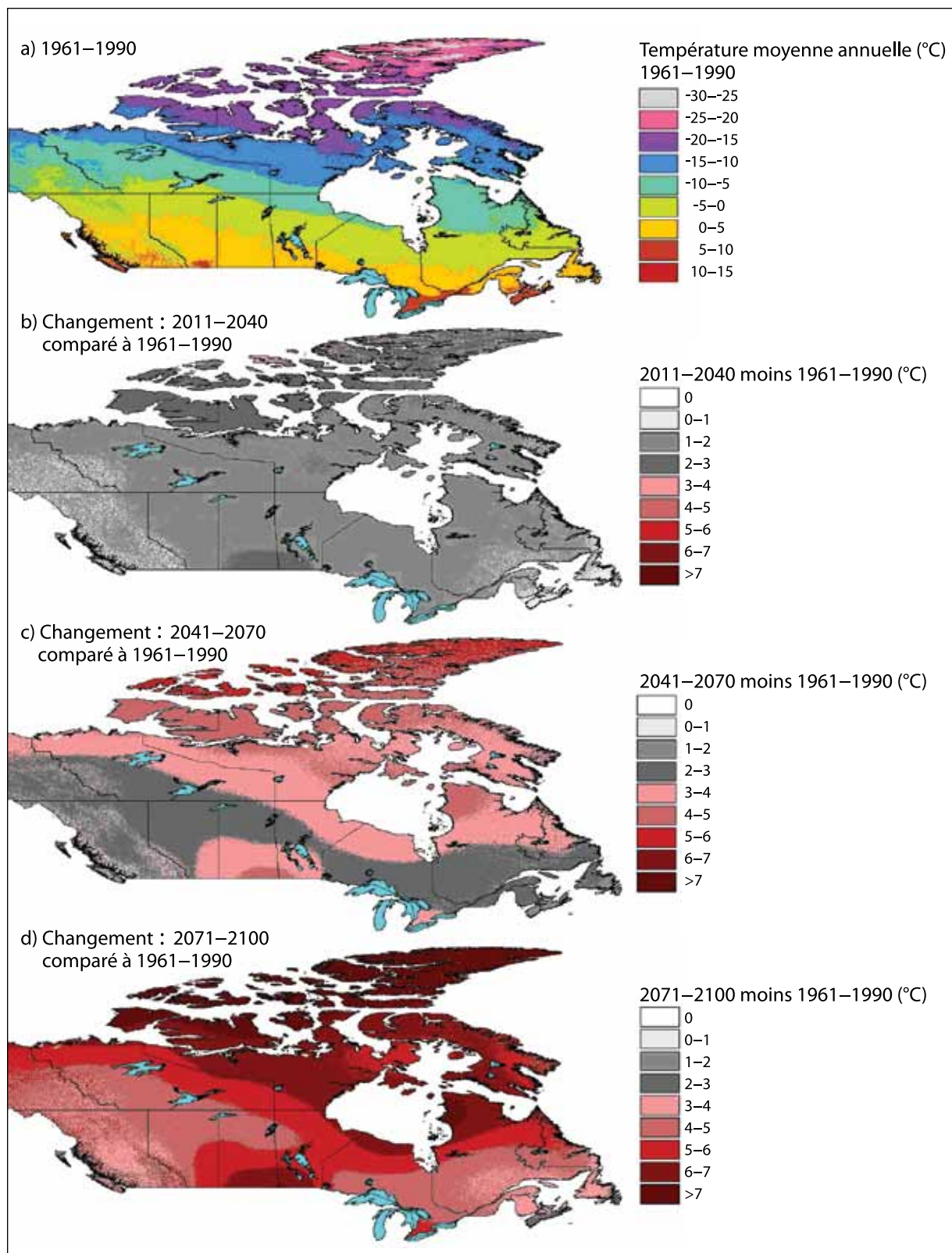


Figure 2. Exemple de la variation spatiale et temporelle des changements prévus (MCCG2-A2) de la température moyenne annuelle au Canada. a) température moyenne annuelle récente (1961–1990) et changement comparé à 1961–1990 pour b) 2011–2040, c) 2041–2070 et d) 2071–2100. MCCG2-A2 = deuxième génération canadienne du modèle couplé climatique global.

forêts) parce que leur climat froid et leur courte saison de croissance occasionnent des taux inférieurs d'évapotranspiration. L'équilibre entre l'apport d'eau (précipitations) et la perte d'eau vers l'atmosphère (évapotranspiration) doit être pris en compte lorsqu'on évalue l'incidence des changements climatiques sur les régimes d'humidité et les réactions de la forêt.

L'indice d'humidité climatique développé par Hogg (1994, 1997) fournit une méthode utile pour évaluer les différences à la fois spatiales et temporelles des régimes d'humidité en utilisant de simples données climatiques (température et précipitation). L'indice d'humidité climatique correspond à la différence entre la précipitation annuelle et l'évapotranspiration potentielle et s'exprime en unités de centimètres de bilan hydrique par an. Des valeurs positives indiquent des conditions humides qui favorisent la croissance de forêts à couvert fermé, alors que

des valeurs négatives indiquent des conditions sèches typiques des prairies, des couverts forestiers ouverts et irréguliers (p. ex. forêt-parc). La figure 3 illustre les conditions d'humidité d'après l'indice d'humidité climatique pour la récente période historique de 1961 à 1990 et pour l'avenir tel que prévu par le MCG2 et le scénario A2. Les cartes indiquent que malgré les prévisions de précipitations accrues, les climats typiques des prairies (ayant un indice d'humidité climatique négatif) devraient s'étendre vers le nord pour inclure de vastes zones de la forêt boréale Ouest. À l'exception de la région du Pacifique, les valeurs de l'indice d'humidité climatique devraient diminuer dans toutes les régions, avec un assèchement plus rapide du climat selon le scénario A2 (tableau 2), même si les effets devraient probablement moins être ressentis dans les régions qui sont déjà très humides.

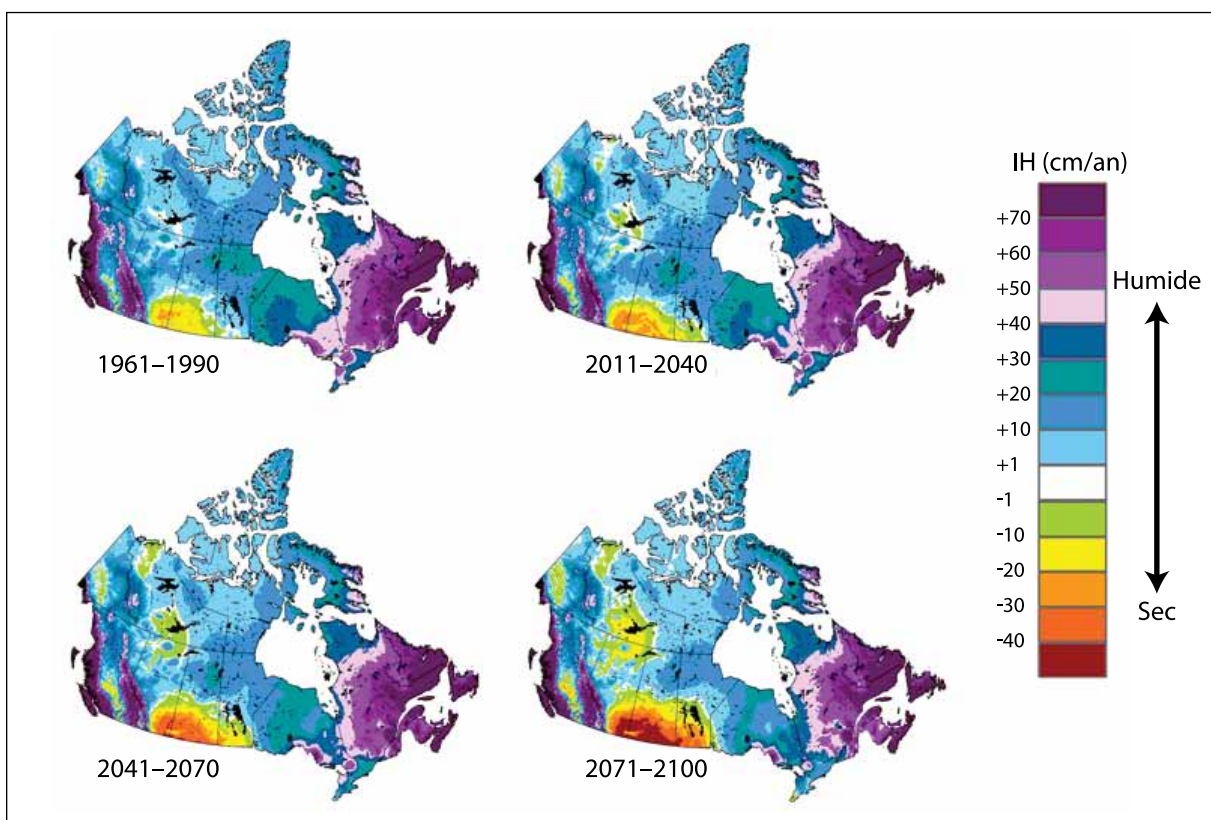


Figure 3. Régimes d'humidité du passé et du futur (MCCG2-A2) selon l'indice d'humidité (méthode Penman-Monteith simplifiée de Hogg [1997]). Les valeurs négatives indiquent les conditions typiques du climat des prairies ou des forêts-parcs. IH = indice d'humidité, MCCG2-A2 = deuxième génération canadienne du modèle couplé climatique global avec le scénario A2 dans lequel le taux d'augmentation des émissions de gaz à effet de serre est comparable au taux de l'augmentation dans les années 1980. Cartes de D. Price, M. Siltanen et D. McKenney.

Bien qu'elles ne le soient pas montrées ici, les prévisions du climat futur effectuées par les différents MCG varient considérablement. Le MCG du CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) prévoit de façon constante des tendances plus prononcées que toutes les autres MCG concernant les variables de température et de précipitation. Des MCG qui restent, le MCG2 et le HadMC3 se rapprochent beaucoup dans leurs projections, alors que le celui du NCAR (National Center for Atmospheric Research) prévoit de façon uniforme le moins de changements au cours du prochain siècle.

Plusieurs sources participent à l'incertitude liée aux projections climatiques. Les principales relèvent des données du MCG qui dépendent de certains facteurs climatiques comme le rôle des nuages et leurs effets radiatifs, modélisant le bilan hydrique sur les surfaces terrestres et saisissant le flux de chaleur à la surface des océans. Dans le quatrième Rapport d'évaluation du GIEC (Solomon et coll. 2007), les prévisions du MCG des futures températures indiquent une fourchette probable de ± 2 °C par rapport aux valeurs moyennes. Le GIEC évalue la certitude de ses projections d'ici la fin du siècle, concernant les températures et les précipitations et provenant d'un ensemble de MCM, comme étant très probables. Parce que nous utilisons beaucoup de ces mêmes données dans notre travail, nous abondons dans le même sens que le GIEC en estimant que les projections mentionnées ci-dessus sont très probables, au moins dans le sens général, si l'un ou l'autre des scénarios se réalise.

2.3 Quelles seront les incidences prévues sur les forêts du Canada?

Dans cette section nous résumons l'information que nous avons sur la façon dont les changements climatiques, comme ceux décrits ci-dessus, influenceront sur la forêt jusqu'à la fin du 21^e siècle. Nous examinons comme auparavant, les perturbations causées par le feu, par les ravageurs et d'autres perturbations biotiques ainsi que la croissance et la succession de la forêt. Comme nous l'avons déjà mentionné (au début de la section 2.2), ces facteurs interagissent de manière non linéaire et complexe; pour que l'évaluation soit complète nous devons donc tenir compte de ces interactions, même si nous ne les comprenons pas encore complètement ou si elles ne sont pas encore pleinement documentées. De plus, ces facteurs devraient continuer d'avoir une incidence bien au-delà de 2100 puisque le climat continuera à évoluer.

2.3.1 Perturbation — incendie

Le tableau 3 présente un résumé de l'évaluation de la tendance actuelle de la superficie brûlée pour cinq régions forestières ainsi que les projections à court terme (2011–2040), à moyen terme (2041–2070) et à long terme (2071–2100). L'exposé qui suit constitue le fondement de cette évaluation.

Tableau 3. Évaluation qualitative des changements dans le domaine de la taille des zones touchées par les incendies en raison des changements climatiques, par région forestière

Période	Atlantique- Forêt mixte	Boréale Est	Boréale Ouest	Montagnarde	Pacifique	Canada
Actuellement	PC	++	+++	--	--	++
Court terme (2011–2040)	PC	++	+++	++	+	++
Moyen terme (2041–2070)	+	+++	+++	+++	++	+++
Long terme (2071–2100)	++	+++	+++	+++	+++	+++

PC = pas de changement observé/attendu. Échelle de changement dans les régions brûlées comme indiqué si après. Augmentation : + bas, ++ modéré, +++ élevé. Réduction : - bas, -- modéré, --- élevé.

Presque tous les brûlis se trouvent actuellement dans les régions boréales Est et Ouest (respectivement 23 % et 75 % des brûlis, de 1959 à 1999). Nous prévoyons d'importantes augmentations de brûlis dans ces régions. Moins de 2 % des brûlis est situé dans les trois autres régions. On recèle dans la région forestière Atlantique-Forêt mixte de vastes zones agricoles et urbaines, ce qui réduit le couvert forestier et morcelle le paysage, entraînant par conséquent une diminution du nombre d'incendies. Dans la région montagnarde et la région du Pacifique, le nombre d'incendies a été relativement bas, en grande partie à cause des activités de lutte contre les incendies. Pour ces trois régions, surtout pour la région montagnarde, on s'attend à ce que la gravité des conditions météorologiques propices aux feux augmente, ce qui occasionnera une hausse du nombre d'incendies. De plus, il se peut que le nombre d'incendies en automne augmente en raison de la prolongation de la saison de feux dans la région Atlantique-Forêt mixte.

L'incidence des changements climatiques sur la gravité des conditions météorologiques propices aux feux a fait l'objet de nombreuses études. Flannigan et Van Wagner (1991) ont comparé les valeurs de l'indice saisonnier de gravité d'incendie (qui mesure la difficulté de maîtriser un incendie, soit une des composantes de la Méthode canadienne de l'indice forêt-météo) pour un scénario de $1 \times \text{CO}_2$ et un scénario de $2 \times \text{CO}_2$ dans l'ensemble du Canada. Le premier scénario représente les niveaux actuels de CO_2 au moment de l'étude, alors que dans le deuxième scénario l'apport de gaz à effet de serre dans l'atmosphère serait équivalent à l'effet obtenu si on doublait le niveau de CO_2 , ce qui se devait se produire vers le milieu du 21^e siècle. Ils ont utilisé les anomalies mensuelles de température et de précipitation issues de trois MCG. Les résultats semblent indiquer des augmentations de l'indice saisonnier de gravité d'incendie partout au pays, comportant une augmentation moyenne de presque 50 %, ce qui correspond plus ou moins à 50 % d'augmentation des superficies brûlées. Stocks et coll. (1998) ont utilisé des données mensuelles des quatre MCG pour examiner les changements climatiques et le potentiel d'incendie dans les forêts boréales du Canada et de Russie. La gravité saisonnière des conditions météorologiques propices aux

feux que l'on avait prévue était semblable à celle prévue par les quatre MCG, indiquant d'importantes augmentations du point de vue spatial du danger extrême d'incendie dans les deux pays selon un scénario de $2 \times \text{CO}_2$.

Stocks et coll. (1998) ont aussi effectué une analyse de données mensuelles qui révélait un début anticipé de la saison des feux et une augmentation importante des zones présentant un danger d'incendie élevé à extrême au Canada et en Russie, surtout en juin et en juillet. Flannigan et coll. (1998) ont utilisé les données quotidiennes du MCG canadien afin de modéliser le potentiel de danger d'incendie selon la Méthode canadienne de l'indice forêt-météo (une valeur numérique relative et sans dimension de l'intensité du feu qui sert d'indice général de danger de feu) pour les scénarios de $1 \times \text{CO}_2$ et de $2 \times \text{CO}_2$ en Amérique du Nord et en Europe. La plupart des études indiquent une importante variation régionale de l'effet des changements climatiques sur la gravité des conditions météorologiques propices aux feux, certaines régions subissant des augmentations importantes tandis que d'autres régions n'indiquant pas de changement ou indiquant une diminution de la gravité d'incendie (p. ex. Bergeron et Flannigan 1995; Flannigan et coll. 2000). Les conséquences du changement climatique sur les perturbations causées par le feu doivent être examinées dans un contexte d'échelle spatiale. Seules quelques études ont chiffré les modifications éventuelles des superficies brûlées attribuables aux changements climatiques. Flannigan et coll. (2005) ont analysé les relations historiques entre les conditions météorologiques et le danger d'incendie d'une part, et la superficie brûlée, d'autre part, en parallèle avec deux MCG afin d'estimer la superficie brûlée future au Canada (figure 4). D'après les résultats, cette superficie augmenterait de 74 à 118 % d'ici la fin du siècle selon un scénario de $3 \times \text{CO}_2$.

Bergeron et coll. (2004) ont commenté les conséquences d'un changement de régime d'incendie sur l'aménagement durable des forêts au Canada. Ils ont découvert que l'activité des feux au cours du siècle devrait être inférieure que celle de l'ère préindustrielle dans bien des endroits de la forêt boréale. De plus, ils avancent que l'aménagement forestier pourrait servir à reconstruire la structure des classes

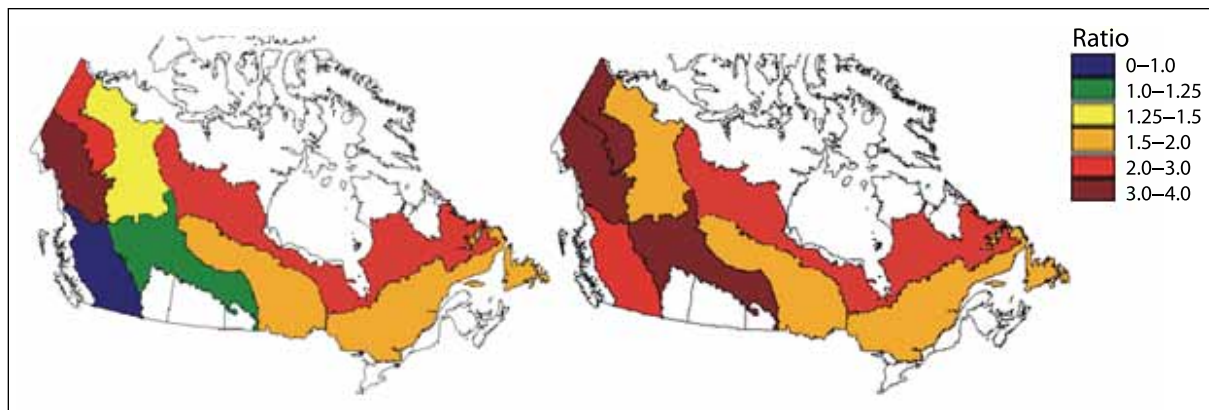


Figure 4. Rapport entre la superficie brûlée projetée ayant une concentration actuelle de 3 x CO₂ atmosphérique et la superficie brûlée projetée ayant une concentration actuelle de 1 x CO₂ atmosphérique par écozone en utilisant les modèles de circulation générale canadien et de Hadley. Le modèle de la superficie brûlée n'a pas pu être appliqué à une écozone pour le modèle de circulation générale canadien.

d'âge de la forêt des paysages préindustriels ravagés par les incendies. Il est probable que d'autres facteurs comme les agents d'allumage, la durée de la saison des feux et les politiques de gestion des incendies joueront un rôle important sur l'incidence des changements climatiques sur l'activité des feux. Dans un monde qui se réchauffe, les probabilités d'allumage pourraient s'accroître en raison de l'augmentation de la foudre (Price et Rind 1994), bien qu'il faille aussi tenir compte des changements de végétation qui peuvent grandement influencer sur les allumages causés par la foudre et les superficies brûlées.

Les changements prévus pour les conditions météorologiques propices aux incendies attribuables aux changements climatiques ont été utilisés pour examiner les effets occasionnés sur la teneur en humidité du combustible et par conséquent sur les changements des taux d'occurrences d'incendie dans certaines parties de la forêt boréale canadienne. Les incendies causés par la foudre ou d'origine humaine sont énormément influencés par la teneur en humidité des combustibles de la couverture morte (Wotton 2008), bien que ces deux types de feux se déclenchent de différentes manières et devraient être pris en considération individuellement dans les analyses de dangers d'incendie à venir. Outre le rôle déterminant de l'activité humaine dans leur allumage, les feux d'origine humaine sont le plus influencés par l'inflammabilité de la litière de surface. Wotton et coll. (2003) ont effectué une étude détaillée sur l'occurrence future des feux d'origine humaine en

Ontario en utilisant des projections quotidiennes de conditions météorologiques propices aux feux et de teneur en humidité des combustibles issues de deux MCG (MCCG2 et MCGHAD2). Selon leurs données, même si les changements liés aux incendies d'origine humaine varieront spatialement dans l'ensemble de la province, on s'attend généralement à une augmentation de 18 % d'ici 2020 et de 50 % d'ici la fin du 21^e siècle.

Même si les incendies d'origine humaine constituent tout juste plus de 50 % des incendies au Canada, les incendies provoqués par la foudre ont toutefois tendance à être le facteur déterminant des superficies brûlées dans la forêt boréale du Canada (Stocks et coll. 2002). L'allumage par la foudre est influencé par la teneur en humidité des couches organiques de la couverture forestière. Wotton et coll. (2005) ont examiné l'occurrence de feux causés par la foudre selon des scénarios de conditions météorologiques propices aux feux et de teneur en humidité tirés du MCCG2 et ont obtenu une prévision d'augmentation du nombre de feux causés par la foudre de 24 % d'ici 2040 et de 80 % d'ici la fin du 21^e siècle. Dans leur analyse, ils ont adopté une approche relativement prudente qui consiste à utiliser les anomalies mensuelles pour générer des scénarios de conditions météorologiques propices aux feux (selon la méthode de Stocks et coll. 1998). Ces scénarios ne prenaient pas en considération le prolongement de la saison de feux et ne comprenaient pas les variations relatives à la

foudre; les auteurs ont donc estimé que leurs prévisions d'augmentations d'incendie étaient assez modérées.

L'exposition au feu de vastes tourbières humides et auparavant gelées devrait augmenter considérablement sous l'effet des changements climatiques. La réaction aux pertes de carbone provenant des incendies de tourbière risque de devenir un facteur déterminant dans le contexte des changements climatiques. Elle peut être positive, c'est-à-dire qu'un climat plus chaud et plus sec donnerait lieu à des conditions propices aux incendies, ce qui entraînerait des hausses d'émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre, aggravant ainsi le réchauffement. Nous craignons également que dans les tourbières le feu se propage plus profondément dans la matière organique exposée, ce qui ajoutera à la difficulté de le combattre. Il faudra donc plus d'effort et de temps pour éteindre de tels incendies, ce qui monopolisera des ressources qui pourraient être utilisées à combattre d'autres feux. De plus, il est fort possible que les feux dormants (feux qui continuent de couver sous la neige pendant l'hiver et qui réapparaissent au printemps suivant) deviennent beaucoup plus courants au fur et à mesure que les feux de tourbières augmentent.

On s'attend à ce que le réchauffement climatique prolonge la saison des feux. Wotton et Flannigan (1993) ont en effet estimé que la longueur de la saison des feux au Canada augmenterait en moyenne de 22 % ou de 30 jours dans un scénario de 2 × CO₂ (vers le milieu du 21^e siècle). De plus, des résultats de recherche permettent à penser que la persistance de crêtes verticales dans la haute atmosphère augmentera dans un climat de 2 × CO₂ (Lupo et coll. 1997), ce qui pourrait avoir une forte incidence sur les incendies de forêt puisque ces crêtes verticales sont associées à des conditions atmosphériques chaudes et sèches en surface et favorisent le développement de vastes incendies de forêt (Skinner et coll. 1999, 2001).

Les politiques de gestion des incendies et leur efficacité continueront d'évoluer. Les modifications aux programmes de prévention, aux moyens d'attaque initiale ainsi qu'aux consignes de restriction d'accès et d'interdiction de faire un feu influenceront sur l'activité de

feu au cours du siècle actuel. Ces variables confusionnelles peuvent freiner ou amplifier l'incidence qu'aura le réchauffement climatique sur le régime de feux. Les résultats d'une récente recherche actuellement sous révision portent à croire que les analyses précédentes pourraient être prudentes et que l'activité de feux au Canada et en Alaska pourrait augmenter de 3,5 à 6 fois par rapport aux taux actuels, d'ici la fin de ce siècle.

2.3.2 Perturbation — biotique

Les insectes herbivores, les pathogènes et les parasites font partie intégrante de la forêt. Ils influent sur la structure et la fonction des écosystèmes forestiers ainsi que sur toutes les valeurs que l'on retire de ces écosystèmes. Dans n'importe quel type forestier, un ensemble varié d'espèces s'alimentent des arbres. La grande majorité de ces espèces sont inoffensives ou même bénéfiques pour la croissance et le développement de la forêt. Cependant, un nombre relativement restreint d'espèces sont capables de se propager sur de vastes étendues et de causer un retard de croissance considérable ou la mortalité d'un très grand nombre d'arbres (pour une liste complète des espèces d'Amérique du Nord, voir Ayres et Lombardero 2000). On qualifie ces espèces d'agents perturbateurs biotiques. Peu importe l'année, la zone forestière en Amérique du Nord touchée par ces agents perturbateurs biotiques et les coûts qui leur sont reliés sont souvent beaucoup plus considérables que ceux causés par les incendies (p. ex. Dale et coll. 2001). De plus, la présence d'arbres morts à la suite de perturbations biotiques peut influencer sur la fréquence et la gravité des prochains feux de friches (p. ex. Bergeron et Leduc 1998; Fleming et coll. 2002), ce qui aggravera les effets de ces perturbations.

Les espèces individuelles d'insectes herbivores, de pathogènes et de parasites sont ultra-particuliers (spécialisent dans leur nourriture) quant aux types de tissus qu'ils consomment (p. ex. racines, tiges [phloème, aubier, bois parfait] et feuillage). En général, le dommage effectué au feuillage et aux racines freine la croissance de l'arbre (les effets répétitifs peuvent même tuer l'arbre), alors que le dommage à la tige provoque souvent la mort de l'arbre (p. ex. Johnson et Lyon 1988).

De plus, les agents perturbateurs biotiques ont tendance à s'attaquer précisément à une essence (ou genre) ou à une classe d'âge (jeune, mûr ou surmature) et dans un milieu distinct. Dans la forêt, ces conditions varient en fonction du temps et de l'espace; par conséquent, les agents perturbateurs biotiques qui nuisent aux arbres et les effets ultimes de ceux-ci (perte de croissance par rapport à mortalité) varieront de façon significative en tout temps ou lieu.

Le tableau 4 présente un résumé de l'évaluation de la tendance actuelle concernant la gravité de l'incidence des changements climatiques sur les perturbations biotiques pour cinq régions forestières ainsi que les prévisions dans un avenir proche (2011–2040), à moyen terme (2041–2070) et à long terme (2071–2100). L'exposé qui suit constitue le fondement de cette évaluation.

La relation qui existe entre le climat et l'abondance et la répartition des perturbateurs biologiques, est complexe (révisé par Ayres et Lombardero 2000). La température et les précipitations influent directement sur la survie, la reproduction, la dispersion et la répartition des insectes, des pathogènes et des parasites. Simultanément, la température et les précipitations (et le rayonnement solaire et le CO₂ atmosphérique) jouent indirectement un rôle dans la physiologie et la physiologie de l'arbre puisqu'ils ont un effet sur la réaction de l'arbre face à l'invasion ou à l'infection.

Ces effets climatiques directs ou indirects influenceront également sur les compétiteurs et les ennemis naturels qui freinent les perturbateurs biologiques. De plus, il est possible que les effets climatiques directs ou indirects interagissent avec des influences anthropiques sur les forêts comme la fragmentation, la pollution, la suppression des incendies et l'introduction d'espèces étrangères. Il est donc très difficile de chiffrer l'importance du climat sur les dynamiques de chaque agent perturbateur biotique. Lorsqu'on prend également en considération la variabilité spatiale et temporelle inhérente aux perturbateurs biotiques, il est sans contredit très difficile de prévoir les effets des changements climatiques sur ces agents.

En l'absence de prévisions sur les effets des changements climatiques sur des agents perturbateurs biotiques particuliers, nous pouvons énoncer des généralités quant à la fréquence et la gravité des perturbations biotiques à venir en nous appuyant sur des indications circonstanciées. Dans une étude sur la relation entre les événements historiques liés au réchauffement climatique et les insectes herbivores, Wilf et Labandeira (1999) ont trouvé que dans l'intervalle de réchauffement climatique datant du paléocène tardif-éocène précoce (il y a environ 55 millions d'années), l'intensité de l'herbivorie à un endroit particulier s'est grandement accrue. Bien que le taux de réchauffement d'alors était beaucoup plus lent que celui prévu pour l'avenir (c.-à-d. le

Tableau 4. Évaluation qualitative de la gravité de l'incidence des changements climatiques sur les perturbations biotiques, par région forestière. L'évaluation prend en considération la taille de la zone touchée, la gravité et la fréquence.

Période	Atlantique- Forêt mixte	Boréale Est	Boréale Ouest	Montagnarde	Pacifique	Canada
Actuellement	PC	PC	++	+++	+	+
Court terme (2011–2040)	+	+	+++	++	++	++
Moyen terme (2041–2070)	++	++	+++	?	++	+++
Long terme (2071–2100)	?	?	?	?	?	?

PC = pas de changement observé/attendu. ? = incertain. Échelle de changement dans les zones touchées par une perturbation biotique comme indiqué ci-après. Augmentation : + bas, ++ modéré, +++ élevé.

Réduction : - bas, -- modéré, --- élevé.

Nota : Le déclin prévu dans la zone touchée et la transition précoce vers « incertain » dans la région montagnarde à court et à moyen terme, respectivement, est le résultat de l'incidence sans précédent et de l'effondrement imminent de l'invasion actuelle du dendroctone du pin ponderosa.

réchauffement a eu lieu durant des millénaires au lieu de décennies), il est très probable que les changements climatiques comprendront une hausse marquée d'insectes herbivores dans les forêts canadiennes, étant donné la grande mobilité, la fécondité et le court cycle de vie des insectes (révisé par Logan et coll. 2003).

Dans l'hypothèse d'une telle augmentation de perturbation biotique imputable aux changements climatiques, on peut avancer d'autres généralisations à propos du genre de réactions que manifesteront ces grands groupes d'agents perturbateurs biotiques. Il se peut que les agents perturbateurs biotiques éventuels réagissent à l'échelle du paysage aux changements climatiques dans l'une des quatre catégories suivantes, selon leur ubiquité temporelle et spatiale. Pour les espèces présentes dans l'ensemble de la répartition de leur arbre hôte (c.-à-d. les espèces indigènes ubiquistes), le réchauffement climatique pourrait influencer sur la fréquence, la durée et la gravité de la perturbation. Quant aux espèces indigènes mais non réparties dans l'ensemble de l'aire de leur arbre hôte (c.-à-d. les espèces indigènes envahissantes), les changements climatiques influenceront sur l'étendue des perturbations ainsi que sur leur fréquence, durée et gravité. Pour les espèces indigènes mais qui ont été inoffensives dans le passé (c.-à-d. les espèces indigènes inoffensives), les changements climatiques pourraient modifier les dynamiques de population et favoriser une propagation de grande envergure. Enfin, pour les espèces exotiques (c.-à-d. les espèces exotiques envahissantes), il se peut qu'à cause du réchauffement, les espèces risquent de s'établir, de persister et d'avoir une plus grande incidence dans l'avenir. Fait à souligner, ces généralisations n'excluent pas d'autres effets possibles des changements climatiques sur les agents perturbateurs biotiques pour chacune des catégories. Par exemple, Fleming (2000) a proposé que le réchauffement climatique puisse amener certains insectes herbivores à changer d'arbre hôte, produisant ainsi un élargissement (supplémentaire) de l'aire de répartition de chaque organisme.

Malgré la difficulté de prévoir individuellement les effets que causeront les agents perturbateurs biotiques sous l'effet des changements

climatiques, des projections ont été réalisées pour deux principales espèces au Canada. La tordeuse des bourgeons de l'épinette (espèce indigène ubiquiste) est sans doute l'agent perturbateur biotique le plus important dans les régions centrale et est du Canada. Pendant au moins les trois derniers siècles, les densités de population de ce ravageur ont connu des cycles réguliers de 30 à 40 ans (Royama 1992). Récemment, Gray (2008) et Candau et Fleming (2005) ont élaboré des modèles statistiques sur les caractéristiques de pullulations en relation avec le climat, la forêt et les variables spatiales. Gray (2008) a projeté les caractéristiques des pullulations qui se produiraient entre 2081 et 2100 à partir de simulations provenant du modèle MCGG3 et du scénario B1 d'émissions mondiales de gaz à effet de serre du GIEC (scénario qui prévoit moins d'émissions futures que le scénario B2 mentionné précédemment dans ce rapport). Gray prédit que, en moyenne, les pullulations dureraient 6 ans de plus et provoqueraient une augmentation de la défoliation de 15 % (figure 5). Fait intéressant, malgré l'augmentation généralisée de la durée moyenne des pullulations, Gray (2008) a prévu que l'augmentation de la gravité des pullulations aurait lieu d'abord aux limites sud et nord de l'aire de répartition de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, présentant un déclin concomitant de la gravité dans la région centrale de son aire de répartition. Cela confirme les spéculations de Volney et Fleming (2000) selon lesquelles 1) la fréquence des pullulations de la tordeuse des bourgeons de l'épinette pourrait s'accroître aux limites sud de son aire de répartition en raison des conditions de sécheresse subies par les arbres hôtes et imputables au réchauffement, et 2) l'aire des pullulations pourrait s'étendre vers le nord en raison de l'amélioration de la synchronisation printanière entre le début de l'alimentation des larves et le débourrement.

Le dendroctone du pin ponderosa (espèce indigène envahissante) est le ravageur le plus important des pinèdes de l'ouest de l'Amérique du Nord. Carroll et coll. (2004, 2007) ont adapté un modèle empirique de probabilités de pullulations (Safranyik et coll. 1975) pour déterminer les répartitions passée, actuelle et future d'habitats favorables sur le plan climatique. En comparant les fréquences annuelles de pullulations aux cartes de répartition historique

d'habitats favorables sur le plan climatique, ils ont découvert qu'en raison du réchauffement climatique au cours des dernières décennies, les populations de dendroctone du pin ponderosa se sont rapidement propagées dans des zones d'habitats qui ne leur étaient pas favorables auparavant, surtout vers les hautes altitudes et les latitudes plus nordiques. Cet élargissement de l'aire de répartition comprend l'invasion récente de pinèdes le long des pentes nord-est des montagnes Rocheuses, adjacentes à la forêt boréale. Afin de déterminer la répartition future d'habitats favorables sur le plan climatique dans l'ensemble de la forêt boréale du Canada, Carroll et coll. (2007) ont mis en application un modèle d'adéquation du climat avec des projections futures de climat tirées du MGCC1 (Flato et coll.

2000) et d'un scénario d'émissions de gaz à effet de serre équivalent au scénario B2 (Solomon et coll. 2007). Les résultats indiquent que le climat des pinèdes boréales conviendra de plus en plus au dendroctone du pin ponderosa dans un avenir proche (figure 6). Ainsi, l'invasion de la forêt boréale par ce ravageur semble probable, même si l'incidence liée à l'élargissement de cette aire de répartition serait probablement moindre que celle observée récemment en Colombie-Britannique, et même si nous n'avons pas encore pris en considération les effets négatifs potentiels ou d'autres formes de changements (p. ex. la fragmentation de la forêt, l'introduction d'espèces envahissantes, l'augmentation d'incendies).

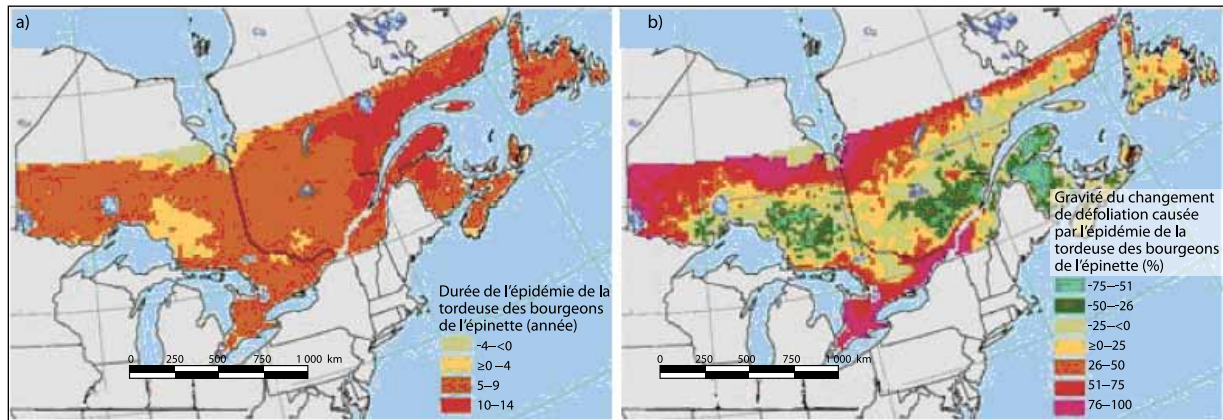


Figure 5. Changements projetés (valeurs de 2081–2100 moins les valeurs historiques) dans (a) la durée de la pullulation de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (années) et (b) la gravité (pourcentage du changement dans la zone défoliée). Adapté de Gray (2008) avec la permission de Springer Science and Business Media.

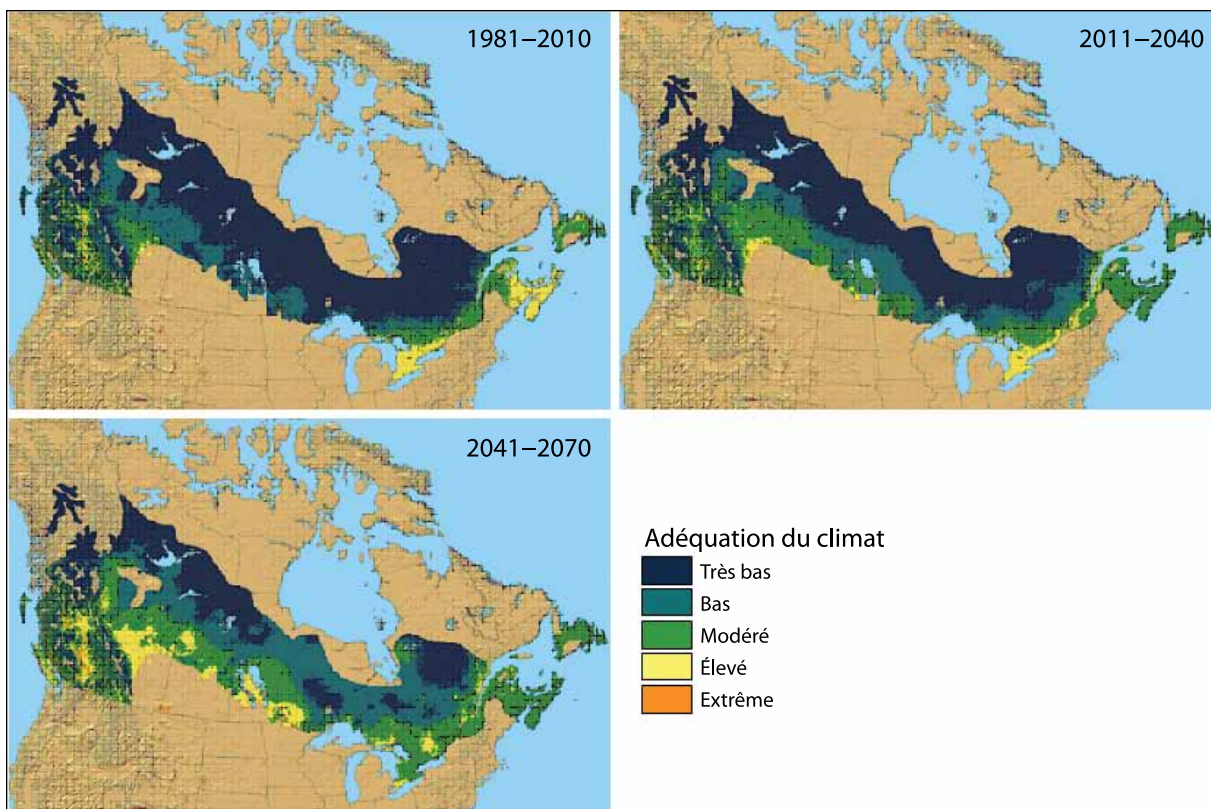


Figure 6. Futures répartitions des habitats dont le climat convient au dendroctone du pin ponderosa dans les pinèdes du Canada (pin tordu latifolié, pin gris, pin rouge et pin blanc de l'Est) d'après un modèle d'adéquation du climat et le MCGC1 ayant un scénario d'émissions équivalent à une augmentation annuelle de 1 % du taux de CO₂ atmosphérique. Les régions dont l'indice est « très bas » et « bas » ne sont pas favorables au dendroctone du pin ponderosa, alors que les régions ayant un indice « élevé » et « extrême » sont celles que l'on considère optimales sur le plan climatique pour ce ravageur. Adapté de Carroll et coll. (2007) avec la permission du Centre de foresterie du Pacifique.

Le degré d'incertitude dans le domaine des prévisions des effets de perturbation biotique dans les forêts canadiennes sous l'effet des changements climatiques est hautement non linéaire. En fait, à court et à moyen terme (c.-à-d. jusqu'en 2070), il est possible que le degré d'incertitude diminue (tableau 4). Ceci s'explique par la tendance qu'ont les essences qui se sont établies à un endroit d'y persister longtemps, même après que les conditions qui ont favorisé leur croissance aient disparu (Payette 1993). Ainsi, en présence d'une évolution rapide du climat, la structure actuelle des forêts canadiennes (par rapport à la répartition et à la composition des essences) changera de façon relativement lente, et les forêts seront donc plus propices à des formes d'agression de grande ampleur d'origine climatique. Il est largement accepté que l'agression des arbres causée par des modèles climatiques inhabituels, comme ceux que pourrait causer un changement climatique, peut être le facteur déterminant de perturbations

biotiques à grande échelle dans les écosystèmes forestiers de l'ensemble du monde (White 1984; Mattson et Haack 1987; Larsson 1989; Ayres et Lombardero 2000). Aussi longtemps que les forêts existantes seront sujettes à une augmentation d'agressions en raison des changements climatiques, il est très probable qu'elles feront face à beaucoup de perturbations biotiques. Cependant, au fur et à mesure que le domaine et l'intensité des effets augmentent, la probabilité de décalages écologiques soudains et catastrophiques causés par ces perturbations peut également augmenter (Fleming 1996), ce qui entraînera une augmentation très rapide du degré d'incertitude concernant les prévisions subséquentes en matière de perturbation.

Le degré de certitude avec lequel nous pouvons prévoir des augmentations à court terme de perturbations biotiques à la suite des changements climatiques peut également varier selon le type d'agents perturbateurs. Bien

qu'un bon nombre d'éléments prouvent que les changements de la physiologie des plantes qui sont d'origine climatique peuvent avoir un effet sur les insectes herbivores, il existe peu d'études analogues sur des pathogènes et leurs résultats sont équivoques (révisé par Ayres et Lombardero 2000). Dans de nombreux cas, la dynamique des facteurs phytopathologiques est en grande partie tributaire de la régulation génétique des interactions hôte-pathogène plutôt que des effets environnementaux (p. ex. Glazebrook et coll. 1997). Par exemple, les effets climatiques sur la physiologie de l'arbre sont relativement négligeables comparativement à l'importance de la génétique de l'arbre pour lutter contre le pathogène agressif qui provoque la maladie hollandaise de l'orme (*Ophiostoma novo-ulmi* Brasier) et la brûlure du châtaignier (*Cryphonectria parasitica* [Murrill] Barr) (Ayres et Lombardero 2000). En contraste, pour d'autres agents perturbateurs pathogènes importants, comme ceux qui causent le pourridié-agaric (*Armillaria* spp.), la maladie du rond (*Heterobasidion annosum*) et la maladie du noircissement des racines (*Leptographium* spp.), on s'attend à ce que les effets des changements climatiques sur la physiologie de l'arbre soient importants (révisé par Ayres et Lombardero 2000).

Étant donné la tendance des forêts actuelles de subsister dans des habitats qui deviennent de moins en moins favorables sous l'effet des changements climatiques, la série d'agents perturbateurs biotiques à court terme comprendra largement ceux que nous connaissons. Il est raisonnable de spéculer sur les futurs effets de quelques-uns des principaux agents perturbateurs biotiques au Canada d'après nos connaissances sur le rôle que jouent les conditions météorologiques et le climat dans leur écologie et leur dynamique de populations.

La livrée des forêts et la tordeuse du pin gris (*Choristoneura pinus pinus* Freeman) (toutes deux des espèces indigènes ubiquistes) sont des insectes défoliateurs qui provoquent des dommages considérables aux forêts canadiennes. Pour ces espèces, Volney et Fleming (2000) ont prédit une augmentation de la fréquence des pullulations le long de la limite sud de leur aire de répartition en raison de la sécheresse causée par les changements climatiques. Ils ont aussi

prévu une propagation des pullulations de ces ravageurs vers le nord attribuable à un risque plus faible de perte catastrophique de feuillage occasionnée par les gelées en fin de printemps.

La spongieuse, espèce exotique envahissante, s'est disséminée pour occuper la majorité des zones tempérées de forêts de feuillus du nord-est de l'Amérique du Nord depuis son apparition près de Boston, au Massachusetts, à la fin des années 1980. Gray (2004) a estimé une augmentation de 95 millions d'hectares (16 %) de l'aire de répartition potentielle de la spongieuse au Canada, y compris une hausse de 1,5 °C de la température moyenne quotidienne.

Le dendroctone de l'épinette, scolyte ubiquiste indigène, a éliminé, de façon périodique, de vastes étendues de peuplements mûrs d'épinettes dans l'ensemble du Canada. Les données indiquent que les changements climatiques ont exacerbé les récentes pullulations sans précédent dans le nord-ouest de l'Amérique du Nord au moyen d'effets directs sur le voltinisme du coléoptère (c.-à-d. un décalage du cycle de vie de 2 ans à 1 an) et d'effets indirects découlant des conditions de sécheresse subies par l'arbre hôte imputables à la température (Berg et coll. 2006). Pour les mêmes raisons, il est très probable que sous les effets des changements climatiques, les incidences du dendroctone de l'épinette augmenteront dans l'ensemble de l'aire de répartition de son arbre hôte.

Nous avons relativement peu d'information sur l'incidence des conditions météorologiques et du climat sur la dynamique de plusieurs autres agents perturbateurs biotiques importants dans les forêts canadiennes, y compris plusieurs insectes défoliateurs (la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura occidentalis* Freeman); l'arpenteuse de la pruche, (*Lambdina f. fiscellaria* (Gn.); la chenille à houppes du douglas (*Orgyia pseudotsugata* McDunnough); la tordeuse à tête noire de l'Ouest (*Acleris gloverana* Walsingham) et (*A. variana* Fernald); les scolytes comme le dendroctone du Douglas (*Dendroctonus pseudotsugae* Hopkins); le scolyte du sapin de l'Ouest (*Dryocoetes confusus* Swaine); les pathogènes (pourridié-agaric, maladie du rond); et un phytoparasite (faux-gui, *Arceuthobium* spp.). La réaction de ces espèces face aux changements climatiques

est peu connue; il est toutefois raisonnable de penser que leurs incidences augmenteront à court et à moyen terme tandis que leur arbre hôte sera agressé sous l'effet des changements climatiques.

Au fur et à mesure que le climat continue d'évoluer, il est très probable que les espèces exotiques envahissantes et les espèces indigènes inoffensives feront plus de dégâts. En fait, on constate déjà les signes de l'augmentation des effets de ces agents perturbateurs. Par exemple, dans le nord-ouest de la Colombie-Britannique, la brûlure en bandes rouges (*Dothistroma septospora* (Dorog.) Morelet, causée par une espèce indigène inoffensive), est responsable de la mortalité généralisée des plantations de pin tordu latifolié (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud. var. *latifolia* Engelm.) à la suite des conditions humides et chaudes (Woods et coll. 2005). Bien que nous ne connaissions pas les effets directs des changements climatiques sur les espèces exotiques envahissantes comme l'agrile du frêne (*Agrilus planipennis* Fairmair) (Dobesberger 2002) et le longicorne brun de l'épinette (*Tetropium fuscum* Fabricius) (Smith et Humble 2000), il est probable que leurs effets augmenteront en raison de l'agression subie par l'arbre hôte sous l'effet des changements climatiques comme nous l'avons mentionné plus haut. De plus, l'augmentation de niches écologiques attribuable à un environnement plus chaud (Ward et Masters 2007), conjuguée à un plus grand nombre d'espèces exotiques au fur

et à mesure que les échanges internationaux augmentent, entrainera un potentiel accru pour l'établissement d'espèces exotiques envahissantes destructrices.

Bien que le phénomène de perturbation est normal dans la plupart des écosystèmes et n'est pas forcément dommageable, les effets qui se situent en dehors de la plage de variabilité naturelle peuvent provoquer une dégradation de l'écosystème, autorenforçante et irréversible (Loehle et Leblanc 1996; Rapport et Whitford 1999). À long terme (c.-à-d. jusqu'en 2100), compte tenu des changements climatiques supplémentaires et du niveau élevé de perturbations (incendies, agents biotiques et leurs interactions) qui dépassent la plage de variabilité naturelle, les forêts canadiennes et la série d'agents de perturbations biotiques qui les touchent ne ressembleront probablement pas à celles que nous connaissons actuellement. Le degré d'incertitude dans le domaine des perturbations biotiques augmentera donc énormément au point où il sera impossible de prévoir l'ampleur de leurs effets (tableau 4).

2.3.3 Croissance de la forêt

Le tableau 5 présente un résumé de l'évaluation de l'incidence des changements climatiques sur la croissance des forêts pour cinq régions forestières, à court terme (2011–2040), à moyen terme (2041–2070) et à long terme (2071–2100). L'exposé qui suit constitue le fondement de cette évaluation.

Tableau 5. Évaluation qualitative de la gravité de l'incidence des changements climatiques sur la croissance forestière (productivité), par région forestière

Période	Atlantique- Forêt mixte	Boréale Est	Boréale Ouest	Atlantique- Forêt mixte	Pacifique	Canada
Actuellement	?	?	?	?	?	?
Court terme (2011–2040)	+	+	-	-	PC	?
Moyen terme (2041–2070)	+	++	-	--	PC	?
Long terme (2071–2100)	+	++	--	---	PC	?

PC = pas de changement observé/attendu. ? = incertain. Échelle de l'incidence comme suit.
Augmentation : + bas, ++ modéré, +++ élevé. Réduction : - bas, -- modéré, --- élevé

On prévoit que la croissance de la forêt touchée par les changements climatiques soit variable dans l'ensemble du pays et selon les essences. La réduction de croissance imputable à la sécheresse dans les régions forestières boréale Ouest et montagnarde est très probable et sera l'incidence la plus frappante à court et à moyen terme des changements climatiques. En revanche, on prévoit de façon générale une croissance légèrement accrue dans l'Est, même s'il est moyennement probable que nous pourrions détecter ce changement en dehors de la plage de variabilité naturelle pendant au moins la première partie de ce siècle. En général, les accélérations de croissance seront inférieures à celles prévues strictement d'après des nouvelles conditions climatiques en raison de la mauvaise adaptation génétique des peuplements aux nouvelles conditions de l'environnement (Andalo et coll. 2005; Beaulieu et Rainville 2005; Savva et coll. 2007). Le déplacement vers le nord de zones de plantation d'origine peut aider à atténuer la mauvaise adaptation et à renforcer le potentiel de croissance qu'offre le nouvel environnement climatique. Ces prévisions ne prennent pas en considération l'effet de l'augmentation des concentrations de CO₂ atmosphérique, qui peuvent stimuler la croissance et réduire l'utilisation de l'eau par les arbres (p. ex. Norby et coll. 2005), et ne prennent pas non plus en considération l'altération potentielle des régimes de perturbations ou l'apparition de ravageurs exotiques qui pourraient avoir des effets importants sur la future productivité forestière.

Le taux de croissance sous l'effet des changements climatiques sera très variable dans les forêts de la région Atlantique-Forêt mixte parce que ces forêts comprennent des essences variées dans les limites nord et sud de leur aire de répartition actuelle. La dynamique de peuplements qui régit la réaction des écosystèmes par rapport aux perturbations devrait favoriser les essences du sud plutôt que celle du nord. Par exemple, la croissance de feuillus de la forêt tempérée, comme l'érable à sucre, devrait s'accélérer, alors que celle du sapin baumier devrait ralentir à la limite sud de sa répartition, surtout en raison de l'intolérance à la sécheresse du sapin baumier (Goldblum et Rigg 2005). Cependant, certaines essences du sud qui pourraient être mieux adaptées au nouveau climat n'occupent qu'une faible

place dans la forêt régionale, ce qui limite leur capacité de tirer profit des nouvelles conditions de croissance pour l'avenir. En revanche, la plantation d'arbres et l'entretien de jeunes peuplements régénérés naturellement sont des pratiques courantes dans ces régions, et ces pratiques forestières permettent de compléter les processus de dynamique de peuplements naturels pour accélérer la transition vers une forêt qui est mieux adaptée aux nouvelles conditions climatiques. Pendant cette période de transition, on s'attend à ce que les perturbations causées par les insectes et les épisodes météorologiques extrêmes (p. ex. ouragans et dégels hivernaux) provoquent une réduction de la croissance et de l'inventaire comparativement au passé.

On prévoit que le gradient actuel de précipitation d'ouest en est dans la forêt boréale Est reste en grande partie inchangé sous l'effet des changements climatiques, si bien que le ralentissement de croissance le plus important attribuable à la sécheresse se ferait ressentir dans les forêts du nord-ouest de l'Ontario (Parker 1998). En général, la croissance de la plupart des essences augmentera avec la hausse de la température. Cependant, le taux de croissance réalisée ne sera pas aussi fort que taux de croissance potentiel en raison de la mauvaise adaptation génétique aux nouvelles conditions. Dans la partie sud de l'écotone, les essences, l'érable à sucre en particulier, pourraient connaître une accélération de croissance et une possibilité d'expansion importante de son aire entre 2041 et 2070 grâce aux nouvelles conditions climatiques, alors que le sapin baumier qui craint la sécheresse pourrait connaître un ralentissement de croissance.

De façon générale, on s'attend à ce que la croissance des arbres de la forêt boréale près de la région des Prairies (écozone des Plaines boréales) ralentisse en raison des conditions de sécheresse, puisque dans cette écozone les conditions sèches de la zone parc-forêt s'étendront vers le nord ainsi que dans les vallées de la Rivière de la Paix et du fleuve Mackenzie d'ici 2041 à 2070 (voir la figure 7 et Hogg et Bernier 2005). La croissance des arbres pourrait néanmoins s'accélérer à plus haute altitude comme dans les collines du nord de l'Alberta et près de la frontière entre la Saskatchewan et le Manitoba, où les conditions sont beaucoup plus

humides (Hogg 1994). Malgré les températures plus élevées imputables à la sécheresse, la croissance du sapin baumier et de l'épinette blanche ne devrait pas s'accélérer au milieu du siècle (Girardin et coll. 2008). De façon générale, il est probable que la croissance des arbres au nord des Plaines boréales, qui est actuellement limitée par les températures froides, s'accélérera mais on peut prévoir que des effets négatifs soient ressentis dans les régions nordiques climatiquement sèches telles que le sud-ouest du Yukon (Hogg et Wein 2005).

Dans la région montagnarde, le climat varie fortement selon l'altitude, passant de chaud et sec dans les basses terres et les vallées à froid et humide dans les zones à plus haute altitude. Comme dans la région boréale Ouest,

on s'attend à une augmentation de la superficie de forêt subissant l'effet des conditions de sécheresse, surtout dans les zones de basse altitude de l'intérieur de la Colombie-Britannique et le long des contreforts du sud de l'Alberta (figure 7). Le pin tordu latifolié domine la plus grande partie des forêts commerciales de cette région, et sa productivité globale a déjà reculé de façon spectaculaire en raison des changements climatiques et de la pullulation régionale en cours du dendroctone du pin ponderosa (p. ex. Carroll et coll. 2004). Dans les zones qui échappent à la pullulation de ce ravageur, on prévoit une amélioration de la productivité du pin tordu latifolié en raison des hausses de température allant jusqu'à 2 °C ou de 3 °C, mais selon des études la productivité connaîtrait soit une augmentation continue (Monserud et

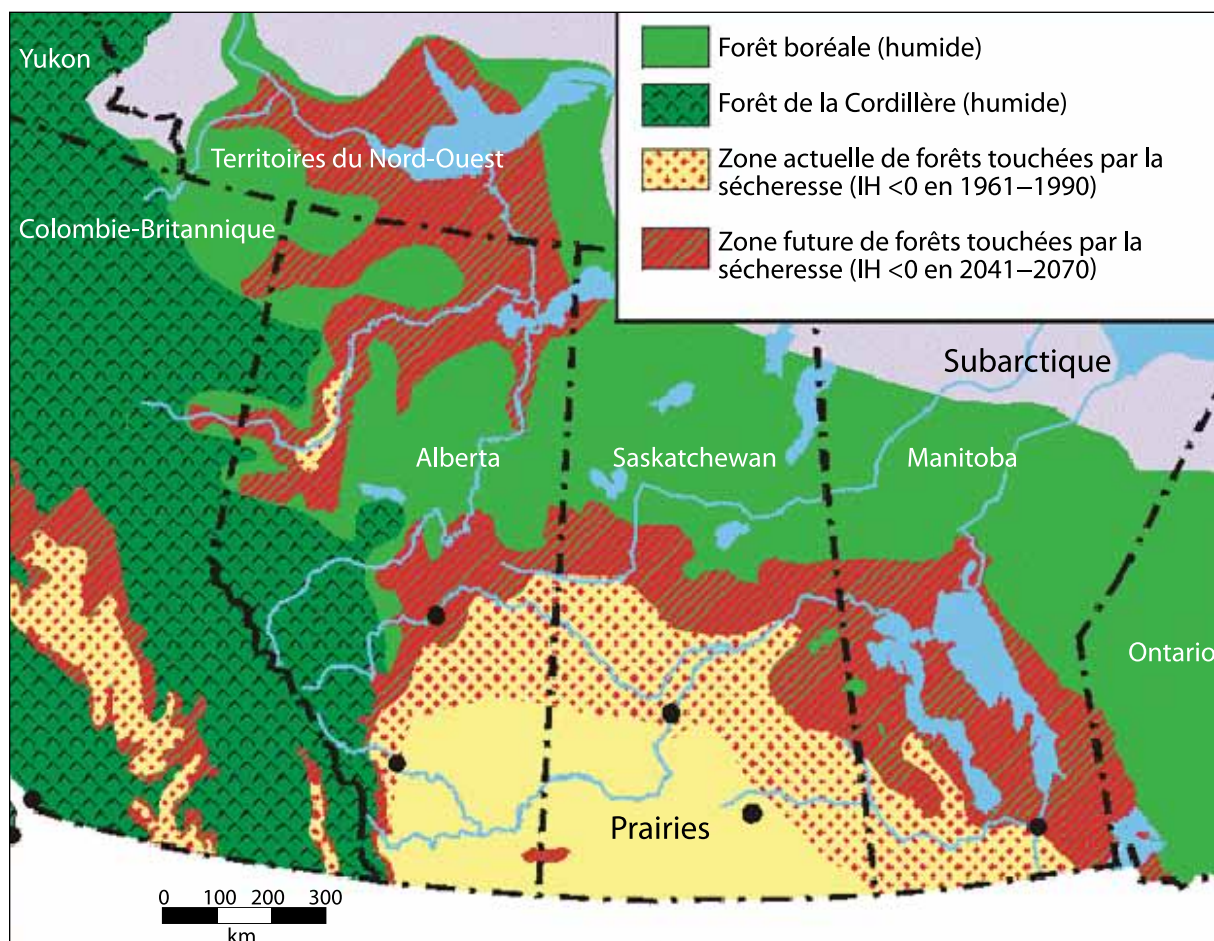


Figure 7. Répartition des forêts touchées par la sécheresse dans la partie intérieure de l'Ouest canadien selon les conditions climatiques observées récemment (1961–1990) et selon un scénario climatique prévu pour 2041–2070 (MCCG2-A2). Les forêts touchées par la sécheresse sont définies comme celles où le niveau de précipitation moyen est insuffisant pour satisfaire aux besoins (évapotranspiration) des forêts productives. IH = indice d'humidité, MCCG2-A2 = modèle de circulation générale canadien couplé avec le scénario A2 dans lequel le taux d'augmentation des émissions de gaz à effet de serre est comparable à l'augmentation du taux dans les années 1990. Adapté de Hogg et Bernier (2005).

coll. 2008) ou une baisse (Wang et coll. 2006) en cas de plus fortes hausses de température. Cependant, toutes les études reconnaissent que la productivité du pin tordu latifolié à l'échelle du paysage diminuera de façon radicale si les températures augmentent de plus de 3 °C, puisque l'aire de répartition de cette essence réduirait en raison de la sécheresse. Des données indiquent aussi un découplage de la croissance et du climat aux limites nord de l'aire de répartition du pin tordu latifolié, ce qui indique un manque d'équilibre entre l'aire de répartition et le climat actuel de ces régions (Rehfeldt et coll. 1999; Johnstone et Chapin 2003) et donc l'absence probable d'une mauvaise adaptation. Cela signifie que les peuplements locaux à la limite nord du pin tordu latifolié pourraient toujours être génétiquement comme ceux « du sud » et ainsi mieux adaptés aux conditions plus chaudes à venir.

Finalement, il est probable que la réaction des forêts de la côte Pacifique face aux changements climatiques varie selon les essences. Une analyse générale de la sensibilité climatique en fonction des essences révèle que celles qui occupent une niche écologique plus large sont plus à même de tirer profit, ou du moins de ne pas souffrir, des effets néfastes que les essences spécialisées dont la croissance est davantage reliée à une échelle restreinte de conditions l'environnementales (Laroque et Smith 2005). Les essences situées sur les basses terres côtières de la zone tempérée pourraient être touchées en raison de la perte des conditions fraîches qui leur étaient propices, alors que la productivité des espèces des zones côtières de mi-altitude pourrait s'améliorer (Burton et Cummings 1995).

2.3.4 Évolution de la forêt

D'après les études paléobotaniques, la valeur généralement acceptée dans le domaine de la vitesse de migration des essences est de 50 km par siècle, bien que de récentes études en génétique laissent entendre la présence de refuge interglaciaire pour les essences et par conséquent, la possibilité d'expansion encore plus lente de leur aire de répartition (McLachlan et coll. 2005; Anderson et coll. 2006). Les changements climatiques déplaceront les isothermes vers le nord d'environ 300 km pour chaque augmentation de 2 °C de température moyenne annuelle, en plus d'un déplacement

vers le nord des habitats climatiques des essences. Selon les prévisions actuelles, il pourrait y avoir une hausse de température de 2 °C dans les 50 prochaines années dans la majorité du Canada (voir la section 2.2). Une telle vitesse de changement devance de toute évidence les prévisions les plus optimistes quant à la capacité migratoire des essences, qui n'est probablement pas plus de 5 km chaque 10 ans, ce qui rendrait l'invasion naturelle de nouvelles espèces improbable au cours du prochain siècle. Des obstacles supplémentaires d'origine humaine, comme la fragmentation de la forêt, empêchent encore plus la migration rapide des essences.

Ainsi, sans l'intervention de l'homme, l'évolution de la forêt comprendra une transition progressive de la dominance des essences déjà présentes dans la matrice de la forêt plutôt que d'une invasion de nouvelles essences découlant de la disparition d'essences actuelles. Par exemple, il se peut qu'au Nouveau-Brunswick le déclin de l'abondance du sapin baumier et des épinettes s'accompagne d'une augmentation de feuillus et de bouleaux (*Bétula spp.*) qui peuvent tolérer des conditions climatiques nordiques. Un tel déplacement compétitif au moyen de la dynamique des trouées pourrait être très lent, pendant des siècles, à moins qu'il ne soit accéléré par des perturbations ou des phénomènes climatiques extrêmes. Il est généralement admis que les perturbations agissent sur la dynamique des forêts (Oliver et Larson 1996) en créant de l'espace pour la régénération. Les perturbations à grande échelle qui remplacent les peuplements sont les plus courantes dans les régions des forêts boréales sensibles aux feux, alors que les perturbations à petite échelle qui provoquent des trouées sont plus courantes dans les forêts humides de la région maritime du Pacifique, dans la région Atlantique-Forêt mixte et dans la forêt boréale de l'Est du Québec. Les perturbations à grande échelle stimuleront la plus vive incitation au changement d'espèces, puisqu'elles ont tendance à favoriser les espèces pionnières (Loehle 2003). Il se peut que les espèces qui se régénèrent par voie végétative après une sécheresse et un incendie, comme le tremble et le bouleau, dominent les conifères lorsque des conditions climatiques chaudes et sèches empêchent l'établissement des semis (Price et coll. 2001). Le couvert de conifères pourrait

être énormément réduit si l'intervalle entre la succession des incendies est trop court pour permettre une maturation sexuelle des arbres. De tels changements locaux pourraient se produire très rapidement, au cours de quelques décennies. On peut observer des exemples de telles transitions dans les forêts à lichens du sud de la forêt boréale de l'Est (Payette et coll. 2000).

En général, les essences sensibles au climat ont tendance à décliner de façon relativement plus rapide, mais ne sont remplacées que lentement par des essences plus tolérantes au climat; ainsi, les changements rapides du climat entraîneront de façon graduelle, un appauvrissement des essences à l'échelle locale. Cela influera aussi sur d'autres plantes et animaux qui dépendent particulièrement d'une essence pour leur habitat, créant par conséquent une perte générale de biodiversité. On croit de façon générale que la composition de la forêt sera plus résiliente aux changements climatiques au centre de l'aire de répartition des espèces (Chapin et coll. 2004). Dans toutes les régions, la migration des espèces assistée par l'homme pourrait être utilisée pour tirer profit des nouvelles conditions climatiques. Des cartes d'aires d'adéquation du climat pour la majorité des espèces du Canada selon les climats actuels et prévus sont disponibles sur le site <http://www.planthardiness.gc.ca/?lang=fr>.

Il est probable que les résineux de la zone boréale disparaîtront de la limite sud de leur aire de répartition dans l'Est du Canada. Par exemple, l'aire de répartition du sapin baumier, sensible à la sécheresse, connaîtra probablement une réduction dans les basses terres de l'écozone maritime de l'Atlantique mais demeurera intacte dans la région des Appalaches de cette écozone. Par contre, l'aire des feuillus tempérés comme l'érable à sucre pourrait s'étendre graduellement dans la forêt boréale (Goldblum et Rigg 2005), mais cette expansion devrait prendre des siècles à moins d'une intervention humaine. Comme nous le mentionnons plus haut, des changements dans les régimes de perturbation, surtout dans la partie ouest de la région boréale Est, peuvent favoriser des essences pionnières comme le bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh.) et le tremble.

On s'attend à des changements notables dans les régions des Plaines boréales et de la Taïga

des plaines de l'Ouest du Canada, où l'épinette noire sera remplacée par des essences plus tolérantes au feu et à la sécheresse (*Pinus spp.*), alors que les forêts de peuplements mixtes de ces régions seront probablement moins touchées (Burton et Cummings 1995). À la limite sud, dans les régions qui sont déjà dominées par des essences tolérantes à la sécheresse (pin tordu latifolié, pin gris et tremble), même la plus petite augmentation de sécheresse, de feux ou de pullulations (p. ex. le dendroctone du pin ponderosa; la tordeuse du tremble (*Choristoneura conflictana* Walker); la livrée des forêts) pourrait suffire pour causer des pertes localisées du couvert forestier.

On s'attend à ce que le pin tordu latifolié disparaisse sur une grande portion de la partie sud de son aire de répartition en Alberta (Monserud et coll. 2008) et probablement aussi dans les régions intérieures de la Colombie-Britannique. Les essences qui vivent en altitude dans les montagnes pourraient également perdre rapidement leur habitat. Par contre, le douglas vert (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco var. *menziesii*) et le pin ponderosa (*Pinus ponderosa* Dougl. ex P. & C. Laws.) devraient s'étendre vers l'intérieur de la Colombie-Britannique (Hamann et Wang 2006). Enfin, des analyses climatiques suggèrent une expansion des écozones de la côte du Pacifique sous l'effet des changements climatiques (Hamann et Wang 2006) et de façon générale, des changements importants dans l'habitat climatique de la totalité de l'aire de répartition de certaines essences (McKenney et coll. 2007). Cela voudrait dire que le stress environnemental et les perturbations provenant des changements climatiques pourraient probablement causer d'importants changements dans la composition des essences au cours des prochaines décennies.

2.4 Quelles seront les incidences sur le secteur forestier du Canada?

2.4.1 Approvisionnement en bois d'œuvre

Comme nous l'avons décrit dans la section précédente, les effets des changements climatiques sur la forêt agiront de diverses façons à la fois sur les aspects biophysique et économique de l'approvisionnement en bois d'œuvre au Canada, avec une envergure et un

type d'effet dans une région donnée qui seront tributaires des changements climatiques de la région. Il y aura des effets sur la qualité et la quantité du bois d'œuvre et sur la quantité et l'emplacement de la matière récupérée³. Le tableau 6 montre un résumé de l'évaluation de certains des effets des changements climatiques, selon la région forestière, actuels et à court terme (2011–2040), à moyen terme (2042–2070) et à long terme (2071–2100). L'exposé qui suit constitue le fondement de cette évaluation.

La majorité du bois que nous couperons au Canada au cours des 50 à 100 prochaines années proviendra des arbres qui poussent déjà ou de ceux qui seront plantés au cours des 10 prochaines années, sans prendre beaucoup en considération les effets des changements climatiques. Comme nous l'avons indiqué dans la section 2.3.3, la productivité dans certaines régions augmentera en raison des changements climatiques, alors que dans d'autres, elle diminuera. Il est donc possible qu'un réchauffement climatique graduel améliore à long terme l'approvisionnement de bois d'œuvre dans certaines régions. Or, cette perspective ne prend pas en considération les effets des perturbations naturelles. Comme nous l'avons indiqué auparavant, les feux de friches, les invasions d'insectes et la sécheresse augmenteront dans de nombreuses régions du pays, ce qui fera augmenter à court terme et la quantité de bois de récupération qui, en retour, diminuera à moyen et à long terme la quantité de bois d'œuvre en raison de l'effet des perturbations sur certaines classes d'âge d'arbres. Toute

amélioration de productivité provenant d'une croissance accrue en raison des changements climatiques ne pourra probablement pas compenser la productivité perdue imputable à l'augmentation de perturbations naturelles (Kurz et coll. 1995). C'est pourquoi Kurz et coll. (2007) ont suggéré qu'il est très probable que les stocks de carbone de la forêt boréale du Canada diminuent sous l'effet des changements climatiques. Bien que ces auteurs n'aient pas examiné la question d'approvisionnement du bois d'œuvre, leurs résultats peuvent être extrapolés pour suggérer que cet approvisionnement diminuera également.

Pour compliquer ce scénario à long terme, il y aura un déplacement vers le nord des zones bioclimatiques et de la limite des arbres, comme le souligne la section 2.3.4, ce qui permettra aux essences du sud d'étendre leur aire de répartition vers le nord. Ceci aura un effet sur les écosystèmes en général et en particulier sur l'approvisionnement en bois à venir. À très long terme, la composition en essences des forêts changera en raison de la compétition et de la succession, qui en retour changeront la composition des essences de l'approvisionnement en fibre, ce qui influera sur les produits et les marchés. Ce changement de composition en essences pourrait augmenter les taux de croissance dans certaines régions et permettre l'établissement d'essences à croissance plus rapide, ce qui augmentera tôt ou tard l'approvisionnement en bois d'œuvre. Les feuillus à croissance rapide, par exemple,

Tableau 6. Évaluation qualitative de la gravité de l'incidence des changements climatiques sur l'approvisionnement de bois d'œuvre (selon la quantité, la qualité et la période), par région forestière

Période	Atlantique- Forêt mixte	Boréale Est	Boréale Ouest	Montagnarde	Pacifique	Canada
Actuellement	PC	+	+	+++	PC	++
Court terme (2011–2040)	+	-	+	+	PC	+
Moyen terme (2041–2070)	+	-	--	--	+	-
Long terme (2071–2100)	+	-	-	-	+	-

PC = pas de changement observé/attendu. Échelle de l'incidence comme indiqué ci-après. Positive : + bas, ++ modéré, +++ élevé. Négative : - bas, -- modéré, --- élevé.

³Gilsenan, R. 2007. Scoping paper on potential implications of climate change for timber supply in Canada. Ress. nat. Can., Serv. can. des for., Dir. pol. écon. aff. int., Ottawa (Ont.). Document provisoire.

pourraient mieux s'adapter (Spittlehouse 2005) aux changements climatiques qu'ils ne font maintenant dans de nombreuses régions. Cette tendance influera non seulement sur la gestion des forêts existantes (p. ex. l'éclaircie), mais aussi sur la planification des forêts de l'avenir en termes de sélection d'espèces.

Une tendance au réchauffement dans les régions à l'est des Prairies favorise la possibilité de sécheresse, d'incendies, de maladies et de pullulations plus graves de ravageurs, surtout de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clemens), selon l'effet qu'auront les changements climatiques sur la relation prédateur-proie. Cependant, cette augmentation de perturbations naturelles pourrait être neutralisée de façon partielle, par la hausse des taux de croissance associée à des plus hauts niveaux de CO₂ atmosphérique, des températures plus élevées, une saison de croissance plus longue et des davantage de précipitations dans certaines zones du nord-est de l'Ontario et de l'ouest du Québec, ce qui pourrait augmenter considérablement la productivité et l'approvisionnement en bois d'œuvre dans ces régions (Colombo et Buse 1998). L'effet net de ces impacts est difficile à prévoir (comme nous le mentionnons dans la section 2.1.2). À l'inverse, une augmentation du risque de sécheresse et de perturbations graves dans le nord-ouest de l'Ontario pourrait avoir de sérieuses conséquences sur l'approvisionnement en bois d'œuvre. La réduction prévue du niveau de précipitations dans cette région pourrait déclencher des pullulations majeures de ravageurs et des incendies (Colombo et Buse 1998). Le sud de l'Ontario pourrait connaître des effets semblables, mais peut-être moins graves.

Les effets des changements climatiques sur l'approvisionnement de bois d'œuvre devraient être plus importants à court et à moyen terme dans la région boréale Ouest en raison de l'augmentation des régimes de perturbations (incendies, ravageurs) et de la sécheresse. Les gains de productivité de la forêt, des pâturages et des cultures pourraient donc être limités par des températures à la hausse et des concentrations élevées de CO₂ atmosphérique ou annulés par des baisses de productivité en raison du manque d'humidité dans le sol, ce qui le rendrait plus vulnérable à la dégradation. La quantité et la qualité d'approvisionnement en fibre provenant

du tremble devraient diminuer dans la partie sud de la région boréale Ouest en raison des effets accrus de la sécheresse, des insectes et des pathogènes fongiques. La plus forte zone de productivité du tremble devrait probablement se déplacer vers le nord (ou en hauteur) vers des régions éloignées, ce qui occasionne à l'industrie des défis liés aux coûts d'accès et de transport du bois d'œuvre.

En Colombie-Britannique, une grande augmentation de la quantité de bois de récupération attribuable aux invasions du dendroctone du pin ponderosa a entraîné une augmentation à court terme d'approvisionnement en bois; à moyen et à long terme, ces invasions auront néanmoins une incidence négative sur l'approvisionnement du bois d'œuvre puisque de nombreux arbres sont abattus plus tôt dans leur cycle de croissance. Comme le décrit la section 2.3.2, des invasions à grande échelle de ravageurs comme le dendroctone du pin ponderosa et du dendroctone de l'épinette devraient persister et s'étendre tandis que le climat se réchauffe. À l'est de la Colombie-Britannique, plus particulièrement en Alberta, on s'inquiète de plus en plus de l'invasion du dendroctone du pin ponderosa, où on peut déjà observer des invasions localisées à l'est des montagnes Rocheuses. Situation particulièrement préoccupante, l'invasion du dendroctone du pin ponderosa—limitée à ce jour aux forêts de pins tordus latifoliés—pourrait atteindre les peuplements de pin gris de la forêt boréale (Johnston et coll. 2006; Carroll et coll. 2007), laquelle s'étend dans l'ensemble du nord des Prairies et vers l'est du Canada, ce qui aurait les mêmes incidences sur l'approvisionnement que celles qu'a subies la région montagnarde de la Colombie-Britannique.

Tous ces facteurs combinés influenceront sur la variabilité de l'approvisionnement en bois d'œuvre, les coûts de mesures d'atténuation et d'adaptation ainsi que sur la nature des réactions et auront des répercussions en aval sur le fonctionnement des usines en matière de coûts, de capacité et d'emplacement. Le tableau 7 présente les incidences prévues de divers effets des changements climatiques sur la quantité et la qualité du bois d'œuvre au Canada ainsi que sur l'approvisionnement et la demande à l'échelle mondiale.

Tableau 7. Exemples des incidences des changements climatiques sur l'approvisionnement de bois d'œuvre au fil du temps

Préoccupation	Échelle des incidences qui touchent l'approvisionnement de bois d'œuvre		
	À court terme (10 ans ou moins)	À moyen terme (jusqu'à 50 ans)	À long terme (au-delà de 50 ans)
Quantité de bois d'œuvre			
Phénomènes météorologiques extrêmes (PME)	Augmentations de bois de récupération attribuables aux PME accrus — problèmes de capacité.	Réduction de l'approvisionnement en bois d'œuvre à l'échelle locale et régionale.	Évolution de la composition des essences vers des essences tolérantes ou des essences ayant un cycle de vie correspondant aux fréquences de perturbation (p. ex. feuillus à croissance rapide au lieu de résineux). Évolution de la structure des classes d'âge de la forêt vers des classes d'âge plus jeunes. Une plus grande imprévisibilité engendre davantage d'incertitude.
Nouveaux agents perturbateurs, changement des régimes de perturbation	Augmentation du bois de récupération.	Mauvaise adaptation des essences aux agents perturbateurs ou aux régimes. À l'échelle locale, possibilité d'une forte réduction de l'approvisionnement en bois à cause du manque de peuplements murs impuif d'importantes perturbations antérieures.	Changements de l'approvisionnement de bois à l'échelle locale et régionale imputables à une combinaison de changements de productivité et d'indices de site.
Réchauffement	Incidences à l'échelle locale et régionale sur la productivité à court terme. Mortalité importante (p. ex. due à la sécheresse).	Changement dans les indices de qualité des sites à l'échelle locale : les sites secs peuvent présenter des taux inférieurs; les sites frais et humide, des taux supérieurs. Changement de la composition des essences, surtout dans les zones de transition et aux frontières de l'aire de répartition des essences.	
Composition des essences	Pas d'incidence à court terme, mais les gestionnaires devraient diversifier le matériel de plantation.	La fréquence accrue de vastes perturbations peut accélérer le processus de remplacement des essences, surtout si on replante. Possibilité de petites incidences sur la productivité au fur et à mesure que des essences mieux adaptées s'établissent.	Les changements de la composition des essences influenceront sur la productivité, l'accès et l'emplacement des usines.

Tableau 7. suite

Préoccupation	Échelle des incidences qui touchent l'approvisionnement de bois d'œuvre		
	À court terme (10 ans ou moins)	À moyen terme (jusqu'à 50 ans)	À long terme (au-delà de 50 ans)
Quantité de bois d'œuvre			
Insectes	Diminution de la qualité en raison des dommages causés par les ravageurs comme le dendroctone du pin ponderosa.	Qualité inférieure de la fibre si de jeunes arbres sont récoltés. Moins d'arbres mûrs en raison des infestations antérieures.	De l'échelle locale à régionale : changement de la caractéristique de la fibre à cause de la substitution d'essences forestières.
Réchauffement	Changement de la qualité de la fibre lorsque la productivité ou la survie est touchée. L'augmentation rapide des taux de croissance peut avoir des répercussions négatives sur la qualité de la fibre et vice versa.	Changement de la qualité de la fibre lorsque la productivité ou la survie est touchée. L'augmentation rapide des taux de croissance peut avoir des répercussions négatives sur la qualité de la fibre et vice versa.	En raison de mesures rapides d'adaptation, il pourrait y avoir des essais d'essences qui appauvrissent la qualité du peuplement, ce qui influera sur la qualité du bois. La substitution des essences changera la variété de produits forestiers, pouvant ainsi retirer à certaines zones des avantages concurrentiels et en présenter des nouveaux.
International			
Approvisionnement	Les augmentations à court terme du bois de récupération peuvent influencer sur les prix à l'échelle régionale.	Les augmentations des taux de croissance et la diversification vers d'autres marchés peuvent offrir d'autres débouchés, mais moins de bois d'œuvre à moyen terme peut réduire l'approvisionnement.	Les augmentations des taux de croissance et de la diversification vers d'autres marchés peuvent offrir d'autres débouchés.
Demande	Les chocs à court terme dans l'approvisionnement étranger et la demande attribuables aux PME comme les ouragans peuvent accroître les demandes à l'échelle mondiale.	La concurrence réduite par des conditions de sécheresse dans les régions des tropiques peut être compensée par une production accrue dans d'autres régions.	La concurrence réduite par des conditions de sécheresse dans les régions des tropiques peut être compensée par une production accrue dans d'autres régions.

2.4.2 Opérations forestières

Les changements climatiques influenceront sur les opérations et les pratiques forestières comme le moment de la récolte et de la construction de routes. Le tableau 8 montre un résumé de l'évaluation de certains des effets actuels sur la forêt et à court terme (2011–2040), à moyen terme (2041–2070), à long terme (2071–2100). L'exposé qui suit constitue le fondement de cette évaluation.

Il y aura probablement davantage de coupes sélectives et d'éclaircie ainsi que de gestion de combustibles à la suite de l'augmentation de la destruction par l'hiver et de l'affaiblissement de la forêt par les ravageurs et à cause de la volonté des gestionnaires de réduire la vulnérabilité de la forêt face aux invasions de ravageurs et aux incendies. En raison des sécheresses plus fréquentes et intenses (p. ex. dans les forêts boréales de l'Ouest), les niveaux de récolte pourraient être réduits et les pratiques modifiées pour intensifier les activités d'éclaircie et accroître l'espacement afin de réduire les conditions de sécheresse.

De façon générale, les régions nordiques devraient subir des effets très différents de ceux du reste du Canada. Les changements dans la longueur et le climat des saisons influenceront sur les pratiques de récolte. La longueur des hivers et l'épaisseur de la neige vont très probablement diminuer dans la majeure partie du Canada. On s'attend à ce que la fonte du pergélisol devienne une question de plus en plus préoccupante, car le sol devenu plus instable réduira l'accès aux sites (et influera possiblement sur la qualité du site).

Les hivers plus courts et plus chauds réduiront la durée et l'utilité des chemins d'hiver, ce qui provoquera en retour des difficultés d'accès et une augmentation des coûts d'infrastructure. Une réduction de la récolte hivernale attribuable à ces difficultés, ainsi qu'une récolte estivale de plus en plus restreinte à cause des dangers d'incendie, entraîneront la réduction de la période de récolte et la diminution éventuelle de la récolte et, plus important encore, des augmentations importantes des coûts du bois. Les changements liés à la période et au volume de débits de pointe des ruisseaux (p. ex. accroissement des eaux de ruissellement) pourraient endommager les routes et d'autres infrastructures comme les bâtiments, ce qui influera sur les pratiques liées à la construction de routes et d'autres infrastructures et les coûts qui leur sont associés.

On prévoit que les pénuries d'eau, déjà présentes dans la région boréale Ouest et dans le nord-ouest de l'Ontario, deviendraient plus fréquentes avec les hausses de températures estivales et de taux d'évaporation, ce qui aura une incidence négative sur l'irrigation et ses coûts de traitement. Comme nous l'avons expliqué auparavant, les sécheresses augmenteront le risque d'autres perturbations naturelles comme les incendies et les invasions de ravageurs.

Des perturbations naturelles de grande envergure, comme celle de l'invasion du dendroctone du pin ponderosa ou de l'augmentation de l'activité des feux, pourraient générer une grande quantité de matériel qui devra être récupéré afin de tirer profit du bois mort. Cette augmentation de matière

Tableau 8. Évaluation qualitative de l'échelle de l'incidence des changements climatiques sur les opérations forestières, par région forestière

Période	Atlantique- Forêt mixte	Boréale Est	Boréale Ouest	Montagnarde	Pacifique	Canada
Actuellement	PC	-	-	---	PC	--
Court terme (2011–2040)	PC	-	--	-	PC	-
Moyen terme (2041–2070)	+	-	-	+	-	-
Long terme (2071–2100)	+	-	-	+	-	-

PC = pas de changement observé/attendu. Échelle de l'incidence est indiquée comme suit. Positive : + bas, ++ modéré, +++ élevé. Négative : - bas, -- modéré, --- élevé.

de récupération posera un grand nombre de défis en matière d'infrastructures et de gestion forestière, y compris les problèmes liés à l'accès aux arbres abattus, à la capacité industrielle pour transformer ce volume accru, au transport pour déplacer une grande quantité de bois mort ou traité et, finalement, les problèmes liés à l'accès aux marchés pendant la saison haute.

Il se pourrait que les technologies actuelles de fabrication de la pâte et des produits du bois ne soient pas optimales étant donné les changements prévus dans l'approvisionnement du bois (concernant la récupération, les essences, la période et la qualité), comme en témoignent déjà les problèmes actuels de traitement du bois récupéré en Colombie-Britannique (Spittlehouse 2005; Ogden et Innes 2007a). Une augmentation de l'utilisation du bois de récupération réduira la qualité moyenne de la fibre ligneuse. Par ailleurs, une dépendance accrue de fibres de moins bonne qualité influe sur les produits et leurs marchés et augmentera aussi les coûts de traitement. Par exemple, certaines scieries en Colombie-Britannique ont dû installer du nouvel équipement pour transformer le bois récupéré plus sec et plus dur, issu des ravages causés par le dendroctone du pin ponderosa, puisqu'il est moins facile de débiter les billes. De plus, la durée de vie du bois récupéré s'avère plus courte que celle que l'on avait prévue, ce qui influe sur la quantité que l'on peut récupérer de façon économique. Les décideurs qui pensent investir dans l'amélioration de la capacité de traitement de leur scierie pour transformer davantage de bois de récupéré devront prendre en considération la disponibilité à long terme d'un approvisionnement adéquat en bois d'œuvre pour déterminer si de tels investissements sont rentables. De telles questions temporelles poseront certains des plus grands défis dans notre capacité de nous adapter efficacement aux changements climatiques.

À long terme, les changements de la productivité et de la composition en essences influenceront sur la récolte, la transformation et les méthodes de plantation en ayant un effet sur l'âge d'exploitabilité, la sélection des essences, la qualité du bois, le volume de bois, la taille des grumes et le développement des infrastructures. Toute augmentation de l'approvisionnement dans les régions nordiques, par exemple,

entraînera une augmentation de l'équipement de traitement et de transport.

Par ailleurs, les modèles internationaux de rendement indiquent que les changements climatiques pourraient accroître la production mondiale du bois d'œuvre, ce qui ferait baisser les prix mondiaux et influencer sur l'offre et la demande sur les marchés régionaux et internationaux (Kirilenko et Sedjop 2007). Cela créera à la fois des débouchés et des dangers pour les vendeurs comme pour les acheteurs, surtout concernant les marchés émergents, comme celui de la bioénergie. Les intervenants de l'industrie qui prendront rapidement en considération ces changements pourront très probablement tirer profit des changements climatiques et des conditions des marchés.

2.4.3 Collectivités tributaires des ressources

Les collectivités éloignées et tributaires des ressources, y compris les communautés autochtones, ont déjà été touchées par les changements climatiques. Ces collectivités sont vulnérables aux périodes de sécheresse, aux inondations par embâcle, aux feux de forêt, à l'absence de gelées tardives au printemps et aux températures hivernales plus chaudes qui ont donné lieu à des évacuations répétées, perturbé des liens de transport essentiels et ébranlé l'économie axée sur la forêt. Les prévisions de hausses de température hivernale raccourciront davantage la période d'utilisation des chemins d'hiver, limitant ainsi les possibilités de livraison de matériaux de construction, de nourriture et de carburants à de nombreuses collectivités ainsi qu'aux villages miniers du nord.

L'augmentation de la fréquence des incendies et des pullulations de ravageurs porteront atteinte à la santé et l'économie des collectivités tributaires de l'industrie forestière, particulièrement dans les régions les plus septentrionales du pays. Les pénuries d'eau représentent peut-être la plus grande menace pour des zones comme la région boréale Ouest, car la sécheresse influera sur l'approvisionnement en eau des collectivités et les revenus du tourisme. On prévoit que les dégâts causés par les ravageurs auraient une incidence positive à court terme sur les collectivités avoisinantes tributaires de la forêt en raison des augmentations initiales de la quantité

de bois récupéré, mais à moyen terme et à long terme, l'incidence sera négative à cause de la diminution de la quantité de bois d'œuvre.

De plus, l'économie locale fera face à la fois à des possibilités et à des défis lorsqu'elle sera exposée aux changements structurels des marchés mondiaux issus des réactions de l'approvisionnement mondial en bois d'œuvre face aux nombreux facteurs, dont les changements climatiques (Williamson et coll. 2006, 2007). La vitesse de réaction des investisseurs de scieries face aux changements dans le domaine de la demande, de l'offre et du prix du bois influera fortement sur la compétitivité de l'industrie et le comportement des prix concernant les produits finis (Irland et coll. 2001).

Les augmentations de perturbations naturelles comme les incendies entraîneront le besoin d'accroître les ressources de lutte pour protéger les collectivités et d'autres zones de haute valeur économique et sociale. On devra évaluer l'augmentation de la demande des services de lutte contre les incendies en fonction du fait que ces services sont subventionnés par les recettes fiscales et les bénéfices tirés des ressources, qui seront également touchés par les effets des changements climatiques (Ohlson et coll. 2005). Les changements dans l'approvisionnement de bois d'œuvre auront également une incidence sur les bénéfices tirés des ressources et les options d'utilisation des terres pour les propriétaires, ce qui pourrait augmenter les conflits liés à l'utilisation des terres (Lemmen et Warren 2004).

2.4.4 Utilisations et valeurs forestières des produits non ligneux

Les forêts offrent non seulement des avantages marchands, mais elles ont aussi une valeur écologique, esthétique, culturelle et patrimoniale. Les changements climatiques auront une incidence sur les services écosystémiques qu'offrent les forêts au Canada, entre autres en séquestrant le carbone, en purifiant l'air et l'eau, en procurant un « coupe-vent », un habitat faunique, de la biodiversité, des plantes médicinales, le cycle des éléments nutritifs et le contrôle de l'érosion (Columbia Mountains Institute of Applied Ecology 2005). Des étés plus chauds et plus secs, par exemple, influenceront sur les cours d'eau et la pertinence de

besoins actuels en matière de protection riveraine. On s'attend à ce que la fonte de la couverture de neige ait une incidence sur l'approvisionnement en eau dans de nombreuses régions du pays. La réduction de la taille des glaciers, de la couverture de neige, les décalages dans la période et la quantité des précipitations ainsi que les périodes de sécheresse prolongées devraient de plus en plus porter atteinte à l'approvisionnement en eau dans la région montagnarde. Dans cette région, des changements hydrologiques et écologiques importants devraient se produire dans les bassins hydrologiques dominés par les pins en raison des activités accrues de récolte afin de récupérer les arbres tués par les coléoptères.

Biodiversité

La faune et les habitats fauniques seront touchés par les nouveaux ravageurs, les nouvelles maladies, les incendies et la substitution des essences forestières. Le déplacement d'espèces vers le nord de même que la compétition d'espèces envahissantes auront une incidence sur les écosystèmes même si nous avons besoin de plus d'études sur la synchronisation de ces effets (Scott et Lemieux 2005). À ce jour, les travaux de recherche ont montré que les hausses de températures, les changements de précipitation et de modèles de sécheresse ont déjà commencé à toucher certaines espèces (Varrin et coll. 2007), puisque l'aire de répartition des espèces mobiles, comme les insectes aériens et les oiseaux, et des animaux, comme le raton laveur, se déplace déjà vers le nord.

La capacité d'espèces de s'adapter individuellement aux changements climatiques dépendra de leur capacité à se disperser dans tout le paysage et de se régénérer, de la richesse de l'espèce pour la sélection et le développement des futures communautés à mesure que ces communautés se rassembleront, et à la variation génétique au sein de l'espèce, qui constitue le fondement de la sélection naturelle (ou humaine) sur laquelle reposent leur évolution en fonction du nouvel environnement.

On verra des déplacements et une colonisation à l'échelle des espèces, et des espèces différentes présenteront différentes fourchettes de tolérance relativement à l'habitat et différentes vitesses potentielles de déplacement. Par exemple, Thompson et coll.

(1996) ont prédit que les animaux sauvages qui réagissent à l'échelle du paysage (p. ex. ceux de plus de 1 kg) seront les plus touchés par les changements climatiques. En effet, les populations d'orignal (*Alces alces* (Linnaeus, 1758)) et de caribou (*Rangifer tarandus caribou* (Gmelin, 1788)) devraient diminuer de façon importante dans tout l'Ontario et le Québec, alors que des espèces comme le cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus* (Zimmermann, 1780)) deviendraient plus abondantes.

Les parcs qui ont été créés pour protéger des espèces individuelles, comme le parc provincial du Woodland Caribou en Ontario, pourraient ne plus être en mesure d'atteindre leurs objectifs sous l'effet d'un climat évoluant rapidement (Lemieux et coll. 2007). Cependant, ces aires protégées comprendront de nouveaux écosystèmes en évolution qui présenteront probablement un changement dans l'écodistrict ou l'écorégion. Même s'il est difficile de prévoir les effets cumulatifs sur la biodiversité, il semble clair qu'il y aura des « gagnants » et des « perdants » et que nous devons revoir les concepts liés à la gestion de l'habitat et à la préservation de la biodiversité.

La dispersion des espèces individuelles sera limitée par la disponibilité des couloirs de migration, de l'habitat adéquat et du mouvement fourrager et prédateur (Inkley et coll. 2004), et les espèces qui ont besoin de faibles écarts de température et de précipitations seront plus sujettes aux risques de mauvaise adaptation ou d'extinction (Varrin et coll. 2007). De même, les propriétés du sol des nouveaux habitats pourraient ne pas convenir à certaines espèces.

Les effets des conditions de sécheresse devraient être surtout visibles dans les milieux forestiers insulaires isolés et les zones limitrophes des forêts le long de la limite nord de la région boréale Est, où les pertes permanentes de couvert forestier devraient fort probablement avoir lieu, causant des pertes d'habitat pour les animaux sauvages, les loisirs et d'autres valeurs non ligneuses (Henderson et coll. 2002). De tels changements auraient également des répercussions lourdes de conséquences pour la biodiversité de ces zones, par l'intermédiaire de la disparition ou de l'extinction des espèces existantes ainsi que de l'arrivée de nouvelles espèces (dont des espèces exotiques).

En fait, ces conditions de changements amèneront probablement l'installation de nouveaux ravageurs et de nouvelles maladies qui auront une incidence encore plus marquée sur les écosystèmes, les ressources forestières et certaines populations humaines. Dans la forêt, les relations intraspécifiques et interspécifiques sont complexes et donc difficiles à prévoir. Il semble toutefois certain que de nouvelles communautés se rassembleront, et au sein desquelles il pourrait y avoir des interactions négatives.

La diversité des essences forestières au Canada devrait être touchée par les changements climatiques. Thompson et coll. (1996) ont prédit que les hausses de température conjuguées aux incendies plus fréquents provoqueront une réduction de l'étendue de la forêt boréale vers le nord et l'est de la région centrale du Canada, et les essences qui s'adaptent relativement bien aux paysages ravagés par les incendies deviendront plus courantes, surtout le pin gris et le tremble. Ils prévoient que la taille des parcelles diminuera dans un premier temps, puis s'élargira pour donner une homogénéité aux paysages forestiers, recelant peu de forêts anciennes. Si les changements climatiques se produisent aussi rapidement que prévu, certaines essences forestières, surtout celles avec de lourdes semences, auront du mal à s'adapter aux changements rapides et pourraient disparaître localement, tandis que les forêts où dominant le pin blanc au sud et l'épinette noire au Moyen Nord deviendront moins fréquentes (Thompson et coll. 1996).

Au fur et à mesure que le climat changera, la biodiversité s'appauvrira probablement dans de nombreuses régions, et la perte de la biodiversité présentera un obstacle à la sélection naturelle, empêchant donc les individus et les espèces de coloniser un nouvel habitat et de s'adapter aux nouvelles conditions. L'écosystème de la toundra, par exemple, comprend des plantes et des animaux adaptés uniquement au climat nordique et à une courte saison de croissance. Ces plantes sont adaptées à luminosité dominante en été et à l'obscurité hivernale du Nord canadien et elles tirent profit de la courte période lorsque les sols peu profonds et pauvres en éléments nutritifs sur lequel repose le pergélisol (ou les terres tourbeuses mal drainées) sont assez chauds

pour les faire pousser. Elles pourraient d'ailleurs ne pas avoir la capacité de s'adapter à la perte de pergélisol provenant de la transformation de la dynamique de leur écosystème.

Services écosystémiques

Les pénuries d'eau représentent peut-être la plus grande menace pour des régions comme celle de la boréale Ouest, où des conditions de sécheresse auront une incidence sur les écosystèmes et le tourisme. En fait, pratiquement tous les aspects liés à la dynamique de l'écosystème seront perturbés dans cette région par une transition vers des conditions sèches rappelant celles des prairies (voir la figure 7). Par exemple, les systèmes aquatiques, les activités récréatives aquatiques et la pêche dans la partie sud de la forêt boréale seront profondément touchés par la baisse du niveau des lacs, la stagnation, l'eutrophisation et la prolifération d'algues pendant les périodes de sécheresse (Schindler et Donahue 2006), associés à l'augmentation du niveau de salinité des lacs (Michels et coll. 2007). Les tourbières comme les bogs et les fens sont fréquentes dans la forêt boréale Ouest, mais inexistantes dans les prairies puisqu'elles dépendent de conditions climatiques humides pour maintenir un niveau élevé des nappes phréatiques. Sous des conditions climatiques sèches, les tourbières et les couverts forestiers associés (l'épinette noire et le mélèze laricin) de la partie sud de la forêt boréale se dégraderont peu à peu en raison de l'augmentation des taux de décomposition de la tourbe ou seront transformés rapidement (avec des pertes importantes de carbone) à la suite de feux de tourbe profonds.

Par ailleurs, les incidences en aval des changements climatiques et de leurs interactions avec d'autres facteurs (p. ex. pollution de l'air, récolte, incendie) augmenteront probablement. Par exemple, selon les prévisions du Millennium Ecosystem Assessment (2005) les écosystèmes d'eau douce auraient, à l'échelle mondiale, la plus grande proportion d'espèces menacées d'extinction en raison des changements climatiques. Les débits bas pendant la saison de croissance attribuables aux changements climatiques auront une incidence sur les cours d'eau qui auront probablement moins d'eau et moins d'éléments nutritifs pour soutenir les écosystèmes aquatiques existants. Parmi

d'autres incidences éventuelles, on observe que les niveaux de soufre des cours d'eau ont récemment augmenté dans certaines régions de l'Ontario (Schiff et coll. 2005; Eimers et coll. 2007) en raison de la sécheresse, même si les dépôts de soufre continuent à diminuer. Cependant, un autre mécanisme potentiel pouvant entraîner une libération accrue de sulfate est la diminution du niveau d'acidité (augmentation du pH) des sols, qui change les dynamismes d'adsorption de sulfate et qui augmente la quantité de sulfate pouvant être transféré (Foster et Hazlett 2002). À l'heure actuelle, les contributions relatives de ces deux mécanismes ne sont pas clairement définies.

Carbone

Le climat joue un rôle important dans l'équilibre du carbone de la forêt et dans sa contribution au cycle mondial du carbone, car il agit sur la croissance de la forêt, la décomposition et les perturbations. Le climat influe donc sur la répartition du carbone dans la biomasse, la matière organique morte et les sols. Par exemple, au fur et à mesure que le climat se réchauffe, on s'attend non seulement à ce que les forêts croissent plus rapidement dans certaines régions, mais aussi à ce qu'elles séquestrent une plus grande proportion de leur carbone dans la biomasse (à l'opposé de la matière organique morte). De plus, les niveaux d'absorption du carbone et les taux de décomposition varient en fonction de la température et des précipitations, comme le font les taux de perturbations naturelles qui peuvent provoquer des pertes de carbone sur de vastes régions (Kurz et coll. 2007). Les forêts aménagées du Canada au cours des années 1990–2005 ont davantage constitué un puits net de carbone qu'une source, mais les projections pour les années 2006–2022 indiquent qu'il est très probable qu'elles constitueront une source nette de gaz à effet de serre en raison de l'infestation actuelle du dendroctone du pin ponderosa, de la pullulation prévue de la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans l'est du Canada, de l'augmentation des coupes de récupération et du danger constant d'incendies (Kurz et coll. 2008). Cette évaluation ne prend cependant pas en compte les incidences des changements climatiques sur le carbone forestier. Le feu joue un rôle essentiel dans l'équilibre du carbone de la forêt canadienne (Kurz et Apps 1999; Bond-

Lamberty et coll. 2007), et on prévoit que les pertes de carbone forestier occasionnées par les augmentations de perturbations naturelles liées aux changements climatiques (surtout les incendies : voir la section 2.3), feront plus qu'atténuer toute augmentation des taux de croissance issue du réchauffement ou d'autres effets des changements climatiques (Kurz et coll. 1995; 2007, 2008). Qui plus est, le carbone devrait être relâché par le réchauffement des tourbières (voir la section 2.3.1), et il semble probable que le carbone emmagasiné dans les forêts canadiennes (aménagée ou non aménagée) diminuera pendant un certain temps. Nous devons donc examiner quelles mesures nous pourrions prendre dans la forêt aménagée pour réduire les émissions de gaz ou augmenter la séquestration afin d'atténuer les changements climatiques, au-delà de toute mesure qui pourrait être prise pour s'adapter aux changements climatiques. Il faudrait, idéalement, se doter des deux types de mesures.

Parcs et loisirs

Les parcs et les aires protégées, qui procurent des possibilités fort appréciées de loisirs et jouent un rôle important dans la conservation des habitats et la préservation du patrimoine, pourraient faire face à des défis particuliers si l'on ne peut pas préserver les espèces naturelles existantes et les écosystèmes dans une région

donnée. Il se peut que les aires protégées ne puissent plus assurer leur rôle de protection envers les écosystèmes, ce qui mènerait à la désintégration des parcs et des espaces naturels (Lemmen et Warren 2004; Scottt et Lemieux 2007). De plus, la durée des saisons des loisirs sera différente, puisque les hivers deviendront plus courts et les étés plus longs, ce qui influera sur les recettes de l'industrie récréo-touristique.

On constate déjà les incidences des changements climatiques sur les destinations touristiques. Dans la partie méridionale sèche de l'intérieur de la Colombie-Britannique, par exemple, la sécheresse et les incendies ont provoqué la fermeture temporaire de nombreuses routes principales et détruit des vergers et des vignobles dans la vallée de l'Okanagan et la vallée du Thompson. Le tourisme en Colombie-Britannique devrait en subir les conséquences, surtout dans le domaine des sports d'hiver, puisque la couche de neige disparaît. Par contre, Browne et Hunt (2007) prévoient que les changements climatiques auront une incidence positive nette sur le tourisme axé sur la nature et d'autres activités de plein air en Ontario. Ces auteurs attribuent cet effet positif principalement à la prolongation de l'été, ce qui permet à la population de s'adonner à ses activités de loisir durant la saison chaude, lesquelles ont d'ailleurs un niveau de participation plus élevé que celles d'hiver.

3. QUELLE EST LA GAMME DE BESOINS EN MATIÈRE D'ADAPTATION?

Les changements climatiques poseront des défis considérables concernant l'aménagement durable des forêts du Canada dans un avenir prévisible. Les systèmes naturels s'adaptent de façon autonome aux changements climatiques. Cependant, du point de vue de l'aménagement, l'adaptation exige une volonté d'y mettre l'effort nécessaire afin d'atténuer les effets potentiels ou de tirer profit de nouvelles opportunités (Smit et Pilifosova 2001). Il y aura des avantages économiques dans certains domaines du secteur forestier, surtout en cas de changements climatiques mineurs; il faudra donc cerner et exploiter ces avantages. Cependant, les effets négatifs sur la forêt pourraient être importants et augmenter au fil du temps, surtout en cas de changements climatiques majeurs; le plus grand défi sera probablement de déterminer comment atténuer ces dommages. En agissant rapidement, on pourra réduire les coûts élevés à venir.

Phénomène extrêmement rapide à l'échelle de temps géologique, les changements climatiques (actuels et projetés) semblent pourtant lents à l'échelle de la vie humaine, ce qui explique le défi à long terme en matière de détection optimale, de compréhension et d'adaptation à ses incidences sur la forêt. En même temps, la gestion forestière au Canada comprend habituellement un aménagement extensif des forêts qui poussent à un taux relativement lent : ceci présente un défi en matière d'adaptation, car les décisions prises aujourd'hui auront des conséquences pendant des décennies et pourraient ne pas être appropriées aux futures conditions de la forêt. De même, des perturbations de grande envergure liées au climat peuvent arriver rapidement. Dans leurs efforts de s'adapter aux changements climatiques, les intervenants du secteur forestier devront concilier ces différentes questions liées à l'échelle de temps en effectuant de la surveillance et des recherches à long terme et par une gestion proactive, souple et adaptative, et par des stratégies d'intervention rapide.

L'incertitude représente le défi le plus important; cela ne justifie toutefois pas l'inaction.

Des incertitudes persistent quant à la façon dont le climat évoluera, lesquelles s'accroissent lorsqu'on prend en considération les effets des changements climatiques sur les forêts, l'état futur possible des forêts, le degré de vulnérabilité des forêts par rapport aux changements climatiques et si les objectifs de gestion en place sont appropriés ou même réalisables. De plus, les effets des changements climatiques se produiront dans un contexte où s'ajouteront d'autres changements liés à l'incertitude (p. ex. en matière de pollution, d'offre et de demande sur les marchés mondiaux, des prix des produits de base, des valeurs du public et de politiques). L'incertitude est inhérente à toute planification, mais les aménagistes ont souvent tenu pour acquis que les conditions actuelles persisteraient et n'ont pas tenu compte, dans une certaine mesure, de l'incertitude écologique ou climatique (Spittlehouse 2005; Jonhston et Williamson 2007). Dans le contexte des changements climatiques, cette hypothèse devient de plus en plus contestable au fur et à mesure que les projections sont éloignées dans le temps. Par exemple, les pratiques liées à la construction de routes, les objectifs en matière de biodiversité, les exigences en matière de source des semences, les normes de reboisement, les lignes directrices de gestion riparienne et une foule d'autres pratiques, règlements et politiques laissent entendre implicitement ou explicitement que les changements climatiques n'auront pas lieu. Il en est de même pour la création et la gestion d'aires protégées; ces mesures reposent sur la protection d'écosystèmes représentatifs définis selon les caractéristiques écologiques actuelles (Lemieux et coll. 2007; Scott et Lemieux 2007). Pour relever le défi de l'adaptation, il faudra intégrer explicitement les aspects liés au degré accru d'incertitude dans le processus décisionnel à tous les niveaux de gestion (Ohlson et coll. 2005; Ogden et Innes 2007a).

3.1 Comment doit-on décider des mesures d'adaptation?

De nombreuses options d'adaptation à l'échelle locale, régionale et nationale ont été

proposées pour le secteur forestier (p. ex. Henderson et coll. 2002; Spittlehouse et Stewart 2003; Lemmen et Warren 2004; Hogg et Bernier 2005; Ogden et Innes 2007a; Lemmen et coll. 2008). Spittlehouse (2005) a établi une distinction entre trois types d'adaptation : l'adaptation sociétale, dont les mesures seraient plutôt stratégiques ou de haut niveau, comme les changements liés aux objectifs de conservation ou aux attentes du public; l'adaptation de la forêt, qui comprend des changements à un niveau opérationnel comme la sélection des espèces, les programmes d'amélioration génétique des arbres et la gestion des incendies; et l'adaptation aux répercussions que subira la forêt, qui comprend des changements dans le domaine de l'utilisation de la forêt comme l'augmentation des coupes de récupération, l'adaptation des technologies de transformation dans les scieries pour tenir compte de l'évolution des caractéristiques de l'approvisionnement en bois d'œuvre, ou des différents besoins pour la protection des valeurs des écosystèmes.

Même si la possibilité de nombreuses mesures existe, il est nécessaire d'adopter une approche systématique pour déterminer la série d'actions la mieux appropriée en matière d'adaptation, bien que nous n'ayons pas encore de cadre de travail bien établi pour le secteur forestier (Johnston et Williamson 2007). Les changements climatiques risquent de produire des effets très négatifs, et une approche d'élaboration de stratégies en matière d'adaptation a donc été fournie à partir des méthodes de gestion du risque (Smit et Pilifosova 2001; Ohlson et coll. 2005; Parry et coll. 2007; Stern 2007; Lemmen et coll. 2008). Une approche de gestion de risque structurée comprendrait cinq étapes : définir le problème d'adaptation, établir les objectifs de gestion et établir les indicateurs de rendement; évaluer les facteurs de vulnérabilité actuels et à venir qui entravent les objectifs; élaborer les stratégies de gestion du risque; évaluer et choisir la meilleure stratégie; et mettre en œuvre, surveiller et ajuster la stratégie choisie. Les stratégies d'adaptation élaborées ainsi peuvent être considérées comme un élément de gestion de risque supplémentaire pour les plans de gestion durable des forêts (Spittlehouse 2005).

3.1.1 Définir le problème et les objectifs

En matière de prise de décision, il faut se doter d'objectifs clairs ce qui consiste d'abord à préciser les questions clés ou les problèmes liés à l'adaptation. On devra aussi préciser le contexte des questions ou des problèmes, y compris l'échelle temporelle et spatiale, le degré d'incertitude et le manque d'information, les cadres stratégiques et institutionnels, et les administrations ainsi que les intervenants. Il faut ensuite établir les objectifs en matière d'adaptation de la forêt future (Ohlson et coll. 2005) et reconnaître que les objectifs actuels pourraient ne plus convenir dans le contexte d'un climat en évolution. Les objectifs doivent être formulés à un niveau approprié pour ceux qui prendront les décisions, mais devraient refléter les valeurs de la société et ses attentes par rapport à la forêt. Par exemple, les objectifs pourraient s'appuyer sur des critères et indicateurs existants de gestion durable des forêts utilisés à l'échelle nationale et provinciale dans les plans d'aménagement forestier et dans les normes de certification (Lemmen et Warren 2004; Ogden et Innes 2007a, 2007b). Les six critères et indicateurs d'aménagement durable des forêts du Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF) se rapportent à : la biodiversité, l'état et la productivité des écosystèmes, le sol et l'eau, le rôle dans les cycles écologiques planétaires, les avantages sociaux et économiques, et la responsabilité de la société (CCMF 2006).

Cependant, les objectifs actuels de l'aménagement durable des forêts pourraient devoir être réorientés en raison des changements climatiques. Par exemple, une des possibilités serait d'orienter les objectifs sur le maintien ou l'amélioration de la résilience de la forêt face aux changements climatiques. Le terme résilience se définit comme la capacité de la forêt, en tant que système écologique, de subir un changement de sa structure interne essentielle et de son fonctionnement sans que ceux-ci soient l'objet de perturbations fondamentales et catastrophiques. Une méthode d'aménagement qui cherche à imiter les perturbations naturelles a été proposée comme moyen de conserver la résilience (Drever et coll. 2006). De façon

plus générale, se concentrer sur la résilience mettrait l'accent sur l'importance de conserver la biodiversité et l'hétérogénéité de la structure forestière.

3.1.2 Évaluer les vulnérabilités

L'évaluation des vulnérabilités par rapport aux valeurs et objectifs liés à la forêt est essentielle à la prise de décision en matière d'adaptation (Spittlehouse et Stewart 2003; Johnston et Williamson 2007; Williamson et coll. 2007). On entend par vulnérabilité le degré par lequel un système risque de subir des effets néfastes, dans ce cas-ci par les changements climatiques (Smit et Pilifosova 2001), et ce, à toute échelle, soit locale, régionale ou nationale. Cela dépend du degré auquel le système est exposé aux changements climatiques, de la sensibilité des objectifs, des valeurs et des utilisations en rapport avec ce degré d'exposition, et de la capacité du système à ajuster ou adapter ses caractéristiques ou son comportement pour faire face à l'exposition (Ohlson et coll. 2005; Johnston et Williamson 2007). Il est également influencé par des stressseurs qui ne sont pas reliés aux changements climatiques (p. ex. la pollution). La capacité d'adaptation du secteur forestier est déterminée par des caractéristiques socioéconomiques et par d'autres caractéristiques du secteur et de ses intervenants. Elles comprennent le degré de flexibilité lié aux politiques et à la planification, la distribution et la disponibilité de ressources financières, la capacité technologique, le capital humain et les réseaux de relations, ainsi que les perceptions des risques (Smit et Pilifosova 2001; Johnston et Williamson 2007; Williamson et coll. 2007).

On peut évaluer la vulnérabilité pour une série de scénarios de changements climatiques, en prenant en compte d'autres influences. Comme nous l'avons déjà mentionné, certaines mesures d'adaptation aux changements climatiques auront lieu de façon naturelle. Toutefois, la planification de ces mesures peut représenter une volonté de faire des choix visant la réduction de la vulnérabilité du système grâce à la diminution de sa sensibilité aux changements climatiques, à l'augmentation de sa capacité d'adaptation et à la mise à profit des possibilités issues des changements climatiques.

3.1.3 Élaborer des stratégies d'adaptation

Les stratégies d'adaptation devraient être établies en fonction de l'examen approfondi d'une gamme de mesures potentielles; diverses séries de réactions possibles peuvent être alors associées aux fins de diverses stratégies (Smit et Pilifosova 2001; Ohlson et coll. 2005). Ces stratégies devraient tenir compte des impacts cumulatifs, du risque, de l'incertitude et des besoins des intervenants. Si possible, les décideurs devraient également rechercher la synergie qui existe entre les stratégies visant l'adaptation aux changements climatiques et celles visant l'atténuation des changements climatiques au moyen de la réduction des émissions de gaz à effet de serre ou de l'augmentation de la séquestration de carbone (Parry et coll. 2007; Ravindranath 2007).

Il importe de procéder à une intégration. En effet, une adaptation efficace et réussie ne pourra avoir lieu que par l'intégration systématique des considérations climatiques aux cadres actuels de planification et décisionnels concernant la forêt, au lieu de mettre en œuvre des politiques ou des programmes individuels, bien que ces derniers puissent aussi s'avérer parfois très utiles. Les mesures doivent être prises au niveau approprié, que ce soit au niveau stratégique ou opérationnel (Spittlehouse 2005; Ogden et Innes 2007a). Par exemple, dans un plan stratégique d'aménagement forestier, les stratégies d'adaptation porteraient sur des zones étendues et une longue échelle de temps, ayant souvent des objectifs reliés aux conditions forestières souhaitées à l'avenir. Les plans opérationnels préciseraient les mesures d'adaptation destinées aux zones plus petites et dans une échelle de temps plus courte tout en concordant avec le plan stratégique. Un des bénéfices importants de l'intégration est qu'elle offre plus de chance d'éviter une mauvaise adaptation ou une vulnérabilité accrue face aux changements climatiques en raison du manque d'information sur les effets potentiels externes d'une politique donnée qui n'est pas reliée aux changements climatiques ou en raison du manque de prise en considération de ces effets.

Il est probable que les stratégies proactives soient meilleures que les stratégies correctives

puisqu'elles ont plus de chance d'éviter ou d'atténuer les effets négatifs et les vulnérabilités ainsi que de rechercher de nouvelles opportunités et d'en tirer profit (Ohlson et coll. 2005). En général, elles pourraient être moins coûteuses. Les stratégies proactives comprendraient des mesures prises maintenant en prévision des futurs effets ainsi que des mesures planifiées pour l'avenir (Spittlehouse et Stewart 2003). L'adaptation préventive est surtout importante dans le secteur forestier canadien en raison de l'âge élevé de révolution; de façon idéale, les essences que l'on choisit de planter aujourd'hui pourront s'adapter au nouveau climat du futur (Lemmen et Warren 2004). Des mesures correctives seront nécessaires, par exemple, pour réagir aux perturbations naturelles ou aux phénomènes météorologiques extrêmes imprévus. Même dans ces cas, il est possible d'élaborer à l'avance des systèmes de prévision, de planification et de mesures qui diminueront l'effet de tels événements.

Le degré élevé d'incertitude associé à un climat en évolution, à ses effets et aux vulnérabilités des différents systèmes souligne l'importance éventuelle d'implanter autant que possible des stratégies qui reposent sur des principes de gestion adaptative; cette approche cherche explicitement à traiter l'incertitude. En fait, il faut établir un processus itératif d'apprentissage à partir de la mise en œuvre des décisions, grâce à la recherche, à la surveillance et à l'évaluation des résultats pour ensuite ajuster les décisions en cas de besoin (Murray et Marmorek 2004; Marmorek et coll. 2006; Zhou et coll. 2008). On cherche en somme à permettre à la gestion de réagir aux incertitudes plus efficacement et avec plus de souplesse, bien que la gestion adaptative ait ses propres défis (Stankey et coll. 2005; Marmorek et coll. 2006).

3.1.4 Évaluer, prendre des décisions et mettre en œuvre

Les multiples critères décisionnels peuvent servir à évaluer les diverses stratégies d'adaptation et les compromis qui leur sont associés. Ces critères comprennent ceux liés à l'incertitude; les critères économiques y compris l'efficacité et l'incidence sur la compétitivité; les critères sociaux comme l'équité et les effets sociaux; et les critères environnementaux (Hauer et coll. 2001; Ohlson et coll. 2005). Les meilleures stratégies d'adaptation traiteront des

incertitudes grâce à leur aspect rigoureux pour une variété de conditions forestières éventuelles, ce qui nécessite une connaissance quant à la variété dont il pourrait s'agir à des échelles appropriées pour la prise de décision. D'autres critères reliés à l'incertitude comprendraient le degré d'incertitude lié à l'atteinte de l'objectif visé, le niveau de risque lié aux résultats graves et le degré de souplesse future dont est dotée la stratégie.

L'analyse économique s'avère très utile à la prise de décisions en matière d'adaptation, bien que peu d'attention ait été accordée jusqu'à maintenant aux aspects économiques de l'adaptation (Dore et Burton 2000; Hauer et coll. 2001; Parry et coll. 2007; Stern 2007). L'adaptation aura un coût, mais elle constitue un volet essentiel une réaction efficace sur le plan économique face aux changements climatiques, c'est-à-dire une réaction qui vise à atteindre les meilleurs résultats au moindre coût d'investissement de ressources (Stern 2007). Au fil du temps, les coûts et les avantages des diverses stratégies en matière d'adaptation devraient être pris en considération en relation aux coûts et aux avantages des effets des changements climatiques, mais les études d'impact ont eu tendance à se concentrer plus sur les incidences physiques et la vulnérabilité que sur les incidences économiques (Ohlson et coll. 2005; Parry et coll. 2007; Stern 2007). L'analyse économique peut également être compliquée lorsque des mesures destinées à l'adaptation contribuent ou empiètent sur d'autres objectifs.

Le processus de prise de décision sera renforcé si les différents intervenants du secteur forestier y sont inclus. Or, les divers intervenants accordent différentes valeurs à la forêt, ont des niveaux de connaissance variés et auront différentes perspectives sur les meilleures manières de réagir aux changements climatiques (Ogden et Innes 2007b). Les perceptions du risque et de la capacité d'adaptation varieront également. Par exemple, Williamson et coll. (2005) ont trouvé qu'un groupe de professionnels du secteur forestier semblait penser que les risques pour les écosystèmes étaient supérieurs aux risques pour les collectivités tributaires de la forêt. Pour certains, les difficultés actuelles auxquelles est confrontée l'industrie forestière peuvent rendre la question de l'adaptation aux changements climatiques moins prépondérante. Dans une

enquête auprès de spécialistes forestiers du Yukon et des Territoires du Nord-Ouest, Ogden et Innes (2007b) ont trouvé que des facteurs comme les prix des produits de base, l'assurance du capital, la disponibilité du bois d'œuvre, les politiques commerciales et la réglementation de l'environnement représentaient souvent des questions plus urgentes que les changements climatiques, même si bon nombre de répondants s'attendaient à une augmentation de l'ampleur des changements climatiques dans l'avenir. Par contre, dans une enquête pancanadienne auprès de personnes préoccupées par les aires protégées, Scott et Lemieux (2007) ont trouvé que la majorité d'entre elles pensaient que les changements climatiques représentaient aujourd'hui une question de gestion importante. Il est essentiel de comprendre ces types de différences pour établir des stratégies d'adaptation équilibrées qui seront appuyées par les intervenants (Spittlehouse 2005; Johnston et Williamson 2007). Il se peut qu'une analyse de ces différences indique si l'éducation ou le dialogue sont requis.

3.2 Quelle est la situation du secteur forestier en matière d'adaptation?

Dans le secteur forestier, la prise de conscience des changements climatiques en tant que problème a rapidement évolué grâce à la publication d'un certain nombre de résumés sur les connaissances acquises en matière d'incidences et d'adaptation au cours des dernières années (p. ex. un numéro spécial paru dans *The Forestry Chronicle* en septembre-octobre 2005; Johnston et coll. 2006; Lemmen et coll. 2008; Williamson et coll. s.d.⁴) et aux activités de recherche continues provenant de scientifiques du gouvernement fédéral et des gouvernements provinciaux ainsi que des universités. Les efforts d'adaptation sont en cours et la plupart se concentrent sur l'acquisition d'une meilleure compréhension, la sensibilisation, la diffusion de l'information, l'analyse des besoins d'adaptation, l'intégration des changements climatiques aux processus de planification, et une coopération accrue. Certains des premiers efforts pour mettre en place ces mesures d'adaptation ont été réalisés. Par exemple, certaines entreprises ont essayé

d'intégrer les changements climatiques dans leurs plans d'aménagement forestier (Johnston et Williamson 2007). Cependant, nous n'avons pas encore vu de mesures sur le terrain, systématiques, substantielles et planifiées en réponse aux changements climatiques, principalement en raison de la complexité et des incertitudes.

Dans une perspective très générale, le CCMF a commencé à discuter de la signification des changements climatiques pour la forêt du Canada et le secteur forestier. Le Groupe de travail sur l'innovation du CCMF, avec le Service canadien des forêts, a tenu deux ateliers de consultation au début de 2007 pour discuter des besoins et des mesures en matière d'adaptation dans le secteur et des rôles respectifs des intervenants du secteur. Un des ateliers s'adressait aux représentants du gouvernement et l'autre s'adressait aux représentants de l'industrie forestière. Lors de ces discussions, il a été suggéré que la coopération et la coordination entre les divers intervenants devraient servir de fondement pour établir un cadre stratégique sur l'adaptation du secteur forestier. Un tel cadre pourrait comprendre plusieurs éléments : améliorer les connaissances nécessaires aux fins de prises de décision en matière d'adaptation (savoir), élaborer des outils et des méthodes pour faciliter la prise de décision (capacité), élaborer des politiques et des plans en matière d'adaptation qui devraient inclure des mesures de rendement et des mécanismes de surveillance (gouvernance), et sensibiliser le public (communications).

Lors de sa réunion en 2007, le CCMF a reconnu que l'adaptation aux changements climatiques était une question stratégique d'actualité pour le secteur. Il a commencé à s'y consacrer, en commençant par une étude sur la vulnérabilité et l'adaptation de trois principales espèces d'arbre. Le CCMF a déjà entrepris des efforts concertés qui aideront à contrer les effets des changements climatiques. En 2005, il avalidé la Stratégie canadienne en matière de feux de forêt, qui est fondée sur une approche de gestion du risque face aux incendies causés par les changements climatiques et par d'autres défis (CCMF 2005). De plus, le CCMF a approuvé

⁴Williamson, T.; Columbo, S.; Duinker, P.; Gray, P.; Hennessey, R.; Houle, D.; Johnston, M.; Ogden, A.; Spittlehouse, D. s.d. Climate change and Canada's forests: from impacts to adaptation. À paraître.

en principe la stratégie nationale de lutte contre les ravageurs forestiers (lors de la réunion de 2007) et a entrepris l'élaboration d'un plan de mise en œuvre qui fournirait un cadre commun en matière d'analyse des risques. Étant donné les incidences notables que les changements climatiques auront sur les perturbations naturelles dans les forêts du Canada, ces stratégies peuvent être considérées comme des réactions proactives importantes.

À l'échelle nationale, divers intervenants du secteur s'entrelient actuellement sur des besoins en matière d'adaptation. Le secteur Forêt du Réseau canadien de recherches sur les impacts climatiques et l'adaptation, qui a travaillé de 2001 jusqu'au milieu de 2007, a orienté ses travaux pour que le secteur forestier ait une meilleure compréhension des incidences des changements climatiques et des options d'adaptation. La Table sur le développement durable du secteur des forêts, co-présidée par Ressources naturelles Canada et l'Association des produits forestiers du Canada ayant des membres dans tout le secteur forestier, a tenu une séance remue-méninges sur le sujet en 2007. La BIOCAP Canada Foundation a appuyé une évaluation effectuée par un groupe d'experts universitaires et du gouvernement sur l'adaptation de la gestion forestière et a établi les cinq recommandations suivantes pour aider le secteur forestier à réduire sa vulnérabilité aux changements climatiques (Johnston et coll. 2006) : accroître la capacité d'effectuer des évaluations intégrées en matière de vulnérabilités à différentes échelles; accroître les ressources consacrées à la recherche scientifique fondamentale liée aux incidences des changements climatiques et aux mesures d'adaptation; examiner les politiques forestières, la planification forestière, les méthodes d'aménagement forestier et les institutions chargées de l'aménagement forestier afin d'évaluer la capacité à atteindre des objectifs sociaux dans le contexte des changements climatiques; améliorer la capacité de gérer les risques; et améliorer la communication et le réseautage concernant les questions associées à l'adaptation.

Les gouvernements provinciaux et territoriaux prennent également des mesures. Par exemple, le gouvernement de la Colombie-Britannique a déclaré que les changements climatiques représentent un risque considérable

pour les ressources forestières de la province, et le British Columbia Ministry of Forests and Range (le ministère des forêts et du territoire de la Colombie-Britannique) se charge de l'élaboration d'une stratégie d'adaptation (BC Ministry of Forests and Range 2006; Spittlehouse 2008). En 2002, le gouvernement du Québec, en collaboration avec d'autres, a annoncé la création d'Ouranos, un regroupement d'experts qui étudient les impacts régionaux et les stratégies d'adaptation potentielles. En Ontario, le ministère des Richesses naturelles a mis en œuvre une stratégie pour faire la lumière sur les changements climatiques, réduire ses incidences et aider le public à s'y adapter. Ce ministère a de nombreuses études en cours pour informer les citoyens et les décideurs (p. ex. Browne et Hunt 2007; Colombo et coll. 2007; Lemieux et coll. 2007). On peut d'ailleurs constater une sensibilisation et une évaluation accrues dans nombre de provinces et territoires.

Des ateliers régionaux ont été tenus pour explorer les incidences des changements climatiques et les options d'adaptation dans des contextes particuliers. À l'automne 2007, le Service canadien des forêts et le ministère des Richesses naturelles de l'Ontario ont conjointement organisé un atelier destiné aux représentants du gouvernement pour examiner les avenues de coopération afin de combler les lacunes dans les connaissances et de concevoir des outils d'adaptation (NRCan-OMNR 2007). Autre exemple récent, lors de l'atelier du Service canadien des forêts, on a examiné la vulnérabilité et les besoins d'adaptation du secteur forestier dans le Canada atlantique (Forêt modèle de Fundy, 2007). Des participants de l'industrie et des gouvernements provinciaux ont cerné les lacunes principales suivantes concernant les connaissances dont le secteur forestier a besoin pour orienter les mesures d'adaptation : des modèles de processus afin de prévoir la croissance future en rapport avec les changements climatiques; des connaissances afin de permettre au secteur de prévoir les changements dans la composition des essences forestières; des connaissances sur les essences et les géotypes les mieux adaptés avant de planter; et des connaissances sur la façon dont les changements de régime de perturbation des insectes évolueront et sur les incidences de ces changements.

3.3 Que doit-on améliorer au processus d'adaptation du secteur forestier?

Une des façons de cerner les besoins d'adaptation est de relever les questions stratégiques clés que se posent les intervenants du secteur forestier, comme celles indiquées au tableau 9. De façon plus générale, les discussions et les ateliers sur les incidences et sur l'adaptation qui ont eu lieu dans l'ensemble du pays et dont nous avons fait mention dans la section précédente ainsi que l'analyse dans ce rapport, laissent entendre que les besoins du secteur en matière d'adaptation sont les suivants : la sensibilisation et de débat, l'amélioration des connaissances, des évaluations de la vulnérabilité, des cadres et des outils de planification, ainsi que la coordination et la coopération.

3.3.1 Sensibilisation et débat

Le besoin primordial est peut-être celui de discuter des répercussions des changements climatiques sur les valeurs que les Canadiens retirent de la forêt, puisque toutes ces valeurs peuvent être touchées par les changements climatiques. Le secteur forestier et la société, de façon plus générale, doit répondre à la question clé suivante en rapport avec l'adaptation : doit-on essayer de maintenir le niveau actuel de valeurs et de services provenant de la forêt? Il pourrait être plus approprié de se demander si on peut maintenir le niveau actuel et de voir comment cette capacité varie selon les différents valeurs et services que l'on retire de la forêt. Il faudra résoudre la question de déterminer ce que devraient être les objectifs d'adaptation. Il est improbable que les mesures d'adaptation puissent résoudre tous les effets potentiels des changements climatiques; et il ne faut pas s'attendre à ce que les mesures d'adaptation préservent entièrement les valeurs que l'on aura choisies. Nos exigences par rapport aux valeurs et aux services provenant de la forêt devront concorder à l'ampleur et aux types de mesure d'adaptation réalisables ainsi qu'aux nouvelles possibilités qui émergent (Spittlehouse 2005). Nous pouvons prévoir avec assurance que le débat sur les valeurs et l'utilisation de la forêt canadienne dans le contexte d'un climat en évolution sera litigieux.

Le débat ne sera utile que si les participants ont une compréhension éclairée des enjeux. Il

faut donc faire connaître aux intervenants du secteur forestier et au public la question des changements climatiques, les risques auxquels est exposée la forêt et les valeurs qu'on en retire, le besoin de mesures d'adaptation, ainsi que les mesures et stratégies possibles.

3.3.2 Amélioration des connaissances

Pour améliorer les connaissances, il est essentiel de se doter d'une vision à long terme et de s'engager à maintenir les capacités du Canada pour détecter, comprendre et rendre compte des effets des changements climatiques et pour réduire l'incertitude liée aux prévisions de ces effets. Les besoins particuliers comprennent les éléments suivants :

- Continuer et élargir la recherche scientifique sur les changements climatiques et ses effets, y compris une évaluation intégrée des effets cumulatifs des changements climatiques et d'autres effets biophysiques sur la forêt canadienne (p. ex. les régimes de perturbation naturelle, la sécheresse, la croissance, la régénération et la succession).
- Offrir un accès facile aux données sur la surveillance du climat et élargir la surveillance du climat aux zones forestières nordiques et de haute altitude.
- Établir des scénarios de changements climatiques qui sont accessibles et détaillés à l'échelle régionale afin de réduire les incertitudes liées à ce qui pourrait arriver, où et quand, étant donné qu'il existe des prévisions réalistes d'émissions de gaz à effet de serre.
- Renforcer les programmes et les systèmes de surveillance pour relever et faire rapidement connaître les modifications de la forêt sous l'effet des changements climatiques.
- Évaluer les effets éventuels des changements climatiques sur les stocks de carbone, l'habitat et la biodiversité ainsi que sur d'autres avantages écologiques, y compris les parcs et les aires protégées.
- Établir des scénarios d'effets des changements climatiques sur l'approvisionnement en bois d'œuvre et sur les répercussions qu'aura l'utilisation du bois de récupération sur les marchés, les scieries et les collectivités

Tableau 9. Exemples de questions stratégiques sur les changements climatiques posées par le secteur forestier

Gouvernement fédéral	■ Comment les changements climatiques toucheront-ils la compétitivité du secteur forestier et comment le gouvernement fédéral devrait-il réagir? ■ Comment les changements climatiques influenceront-ils sur notre capacité à respecter nos obligations en vertu des accords internationaux? Comment les effets des changements climatiques devraient-ils éclairer notre position de négociateur? ■ Que faut-il pour s'assurer de la pertinence et de l'utilisation finale du savoir provenant du gouvernement fédéral concernant les changements climatiques et ses effets sur la forêt canadienne à l'échelle nationale? ■ Devrait-on changer les méthodes de gestion (peu d'intervention) pour les parcs et les réserves naturelles?
Gouvernements provinciaux/propriétaires forestiers	■ Quels types de forêts et de sites risquent plus de ne pas atteindre leurs objectifs de gestion sous l'effet des changements climatiques? Quels types les atteindront plus facilement? ■ Comment devrait-on ajuster les exigences/lignes directrices/politiques de gestion pour améliorer la capacité d'adaptation/l'adaptation? ■ Comment les changements climatiques vont-ils toucher la compétitivité du secteur forestier et comment devraient réagir les gouvernements provinciaux et territoriaux? ■ Comment les régimes de perturbation (feux, ravageurs) évolueront-ils et comment peut-on modifier les stratégies d'intervention pour réduire les pertes et protéger la population? ■ Quelle sera l'incidence des changements climatiques sur l'approvisionnement en bois d'œuvre (prix, croissance, emplacement, quantité, qualité, saison, récupération)? ■ Les méthodes de gestion (peu d'intervention) pour les parcs et les réserves naturelles devraient-elles changer?
Gestionnaires forestiers, industrie	■ Quelle sera l'incidence des changements climatiques sur l'approvisionnement en bois (coût, croissance, emplacement, quantité, qualité, saison, récupération)? ■ Quelle sera l'incidence des changements climatiques sur les scieries, la gamme de produits forestiers et les investissements? ■ Que devons-nous changer en premier dans la gestion, la planification et les pratiques forestières? Quand? ■ Quels sont les types de forêts et de sites qui risquent le plus de ne pas atteindre les objectifs de gestion sous l'effet des changements climatiques? Quels types les atteindront plus facilement? ■ Est-ce qu'il sera plus difficile de se conformer aux normes de certification en raison des changements climatiques?
Collectivités tributaires de la forêt, y compris les collectivités des Premières nations	■ Les effets cumulatifs exigent-ils de revoir en profondeur les pratiques d'aménagement forestier dans certaines régions? ■ Comment les effets sur les forêts vont-ils influencer sur les services écosystémiques (quantité/saison de l'approvisionnement en eau)? ■ Nos collectivités sont-elles plus exposées au danger d'incendies et comment pouvons-nous nous préparer? ■ Comment pouvons-nous nous préparer aux changements éventuels qui toucheront l'aménagement forestier?

- Établir des scénarios d'effets des changements climatiques sur la compétitivité de l'industrie de produits forestiers au Canada, étant donné que les répercussions sur les forêts peuvent varier selon le pays
- Évaluer d'autres effets sociaux et économiques comme ceux sur les collectivités des Premières Nations, les loisirs et le tourisme

Le secteur connaîtra un besoin grandissant d'être mieux informé sur les options possibles de gestion forestière afin de s'adapter aux changements climatiques. Des projets-pilotes et des démonstrations sur le terrain seraient très utiles, comme le seraient des exemples d'adaptation à d'autres types d'événements perturbateurs. Il serait avantageux de tirer parti à l'échelle nationale et internationale de l'expérience des autres. Toute cette information doit être synthétisée et diffusée selon des échelles appropriées afin d'accroître la sensibilisation et d'améliorer le processus décisionnel.

3.3.3 Évaluations de la vulnérabilité

Un important sous-ensemble de l'amélioration des connaissances est l'information sur la vulnérabilité. L'identification et la synthèse des vulnérabilités aideront les décideurs à déterminer, compte tenu de l'éventail de scénarios probables de changements climatiques dont ils disposent, quels sont les écosystèmes forestiers, les valeurs et les collectivités les plus vulnérables. On pourra ensuite se servir de cette information pour établir les priorités de recherche et d'adaptation.

Nous avons besoin d'outils rigoureux en matière d'évaluation de la vulnérabilité qui pourront être utilisés dans un grand nombre de circonstances. Les évaluations doivent être effectuées à des échelles pertinentes à la prise de décision et aux effets qui sont en cause. Dans le secteur forestier, la vulnérabilité des collectivités a été un point particulièrement préoccupant jusqu'à maintenant, puisque c'est le domaine où les effets des changements climatiques peuvent être immédiatement constatés et où de nombreuses mesures d'adaptation seront appliquées (Davidson et coll. 2003; Parkins et MacKendrick 2007; Williamson et coll. 2007). Cependant, à l'échelle locale, on pourrait également évaluer la vulnérabilité des parcs, des services écosystémiques, de la gestion forestière

et de la gestion des usines et des scieries, alors qu'à une plus grande échelle, il se peut que les entreprises et les gouvernements provinciaux et territoriaux soient aussi vulnérables. Les vulnérabilités à n'importe quelle échelle peuvent varier beaucoup selon les circonstances particulières et la capacité d'adaptation des intervenants du secteur forestier.

3.3.4 Planification des cadres de travail et des outils

Le secteur forestier a besoin de trouver une façon d'intégrer et d'utiliser au mieux les connaissances pour planifier et choisir les options d'adaptation. Ici encore, l'échelle est importante : on doit concevoir et élaborer des cadres et des outils de travail à des échelles pertinentes aux décideurs. En outre, on devra relever des options viables, comprenant les coûts et les incertitudes, qui traiteront des objectifs des différents intervenants du secteur. Ces objectifs peuvent inclure le maintien de l'habitat et de la biodiversité, la participation à la régénération de la forêt, la mise en valeur des produits forestiers, ou la gestion du secteur pour optimiser les mesures d'atténuation des changements climatiques. Il va sans dire que la liste d'outils et de techniques utiles est longue. On y trouve entre autres des outils opérationnels comme des modèles climatiques sur la croissance et le rendement de la forêt, l'utilisation des semences et les règles et modèles de transfert, les indicateurs climatiques pour contribuer aux pratiques exemplaires (p. ex. meilleure programmation des opérations de plantation et de récolte, y compris de la récupération); des techniques pour comprendre et incorporer les incertitudes et les risques dans le processus décisionnel courant du secteur forestier (p. ex. favoriser la gestion adaptative); et des cadres de travail pour comprendre comment les politiques forestières actuelles, les règlements, et les pratiques pourraient changer afin d'accroître la souplesse des réactions, sans les compromettre.

3.3.5 Coordination et coopération

Grâce à la coordination et à la coopération, on pourra satisfaire à tous les besoins précités. On devra avoir recours à des mécanismes améliorés de communication, de travail de collaboration et de mise en commun de renseignements, de connaissances et d'expériences.

4. CONCLUSIONS

La deuxième section de ce rapport souligne certaines des incertitudes concernant notre compréhension des répercussions futures des changements climatiques, surtout à l'approche de la fin du siècle. Pour ce qui est de la troisième section, elle fait état des besoins considérables liés à l'adaptation, dont ceux d'une sensibilisation accrue et de débat, d'une meilleure information sur la vulnérabilité, de meilleurs cadres et outils de planification, et un renforcement de la coopération et de la coordination. Tous les intervenants du secteur forestier doivent concentrer leurs efforts sur l'adaptation; les incertitudes, le manque d'information et d'outils et le besoin de débats possiblement animés concernant les objectifs d'adaptation et de gestion forestière ne devraient pas servir de prétextes pour remettre le travail à plus tard. Cette orientation claire s'avère plus que nécessaire afin de minimiser les effets négatifs des changements climatiques et tirer profit des nouvelles opportunités qui pourraient surgir.

Chaque groupe d'intervenants du secteur forestier aura des rôles et des responsabilités propres pour relever les défis liés à l'adaptation, même si certaines responsabilités, comme l'intégration de l'adaptation, doivent être réparties entre tous, et la coordination et la coopération amélioreront l'ensemble des efforts. Les gouvernements sont probablement ceux qui sont plus à même de favoriser la coordination, la mise en commun des connaissances et des expériences, la création de partenariats avec des groupes à intérêts diversifiés pour planifier les mesures d'adaptation, et des séances de sensibilisation du public et des débats. Dans le domaine de l'amélioration des connaissances, les gouvernements ont, depuis longtemps, appuyé la recherche forestière et celle des facteurs qui influent sur la santé de la forêt et le secteur forestier. Ils sont également bien placés pour entreprendre de la surveillance à long terme, des synthèses et des rapports opportuns sur les changements climatiques et les perturbations qui touchent les forêts du Canada, à l'échelle locale et nationale, et pour élaborer des cadres et des outils de travail (p. ex. un cadre d'évaluation de la vulnérabilité des collectivités tributaires de la forêt élaboré par Williamson et coll. 2007). Les

gouvernements provinciaux et territoriaux sont peut-être les mieux placés pour appuyer des travaux de recherche et développement axés sur les opérations, comme sur la provenance génétique ou sur d'autres essais d'espèces, ou l'analyse des effets des changements climatiques sur la croissance et le rendement, en collaboration avec l'industrie, les universités et les scientifiques du gouvernement fédéral. Ils peuvent également contribuer à évaluer les besoins et la vulnérabilité des collectivités, en collaboration avec les collectivités elles-mêmes. Il sera important d'avoir des activités de recherche universitaire continues et conjointes dans tous les domaines.

L'industrie de produits forestiers doit relever le défi de taille de se renouveler pour contrer certaines des pires conditions de compétitivité de son histoire. Cependant, sa santé à long terme dépend aussi des effets qu'auront les changements climatiques sur les forêts et les réactions de celles-ci en matière d'adaptation, à la fois à l'échelle nationale et mondiale. Par exemple, cela peut contribuer à des recherches axées sur les opérations, comme des essais pour évaluer l'efficacité de diverses pratiques forestières en matière d'adaptation à une station particulière. Cela peut également donner des indices sur les marges de manœuvre requises aux politiques et aux pratiques afin de renforcer la capacité d'adaptation.

Pour relever le défi de l'adaptation, il faudra un effort soutenu pendant de nombreuses années. Les changements climatiques relativement petits pendant ces dernières dizaines d'années ont déjà une incidence visible sur la forêt. Si les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre que nous avons utilisés dans ce rapport se réalisent, nous aurons alors des incidences très marquées, tel que précisé à la section 2. Bien qu'il existe de nombreuses incertitudes concernant la nature, l'emplacement et l'échelle exacte des incidences, il ne fait aucun doute que ces incidences se produiront. Même si les efforts à l'échelle mondiale pour réduire les émissions dans les prochaines décennies sont fructueux, ils n'empêcheront pas dans une certaine mesure la continuation des changements climatiques

(p. ex. des températures à la hausse, des saisons de croissance plus longues et des risques plus élevés de sécheresse). Dans ce cas, les changements causés par le climat seraient moins

importants que ceux que nous avons projetés dans ce rapport, mais il y aurait quand même des incidences sur la forêt et sur le secteur forestier, d'où le besoin d'avoir des mesures d'adaptation.

5. REMERCIEMENTS

Ce rapport a été possible dans une large mesure grâce aux révisions et aux discussions des participants lors d'un atelier pour experts en sciences et politiques offert à Ottawa du 24 au 26 octobre 2007 par le Service canadien des forêts concernant les incidences des changements climatiques et l'adaptation, ainsi qu'aux commentaires qui ont suivi. Les participants du Service canadien des forêts étaient Darcie Booth, Rich Flemming, David Gray, Sylvie Gauthier, Irene Hay, Werner Kurz,

Mike Lavigne, Bill Meades, Mary Mes-Hartree, Alex Mosseler, Patrick O'Neill, David Paré, Dave Price, Jan Volney et Tim Williamson. Parmi les autres invités, il y avait Michel Campagna (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune), Steve Columbo (Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario), Paul Gray (Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario), et Mark Johnston (Saskatchewan Research Council). Les auteurs remercient Jennifer Thomas et Brenda Lashley pour la révision du rapport.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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.

Anderson, L.L.; Hu, F.S.; Nelson, D.M.; Petit, R.J.; Paige, K.N. 2006. Ice-age endurance: DNA evidence of a white spruce refugium in Alaska. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 103:12447–12450.

Ayres, M.P.; Lombardero, M.J. 2000. Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens. *Sci. Total Environ.* 262:263–286.

B.C. Ministry of Forests and Range. 2006. Preparing for climate change: adapting to impacts on British Columbia's forest and range resources. B.C. Minist. For. Range, Victoria (C.-B.). [en ligne] http://www.for.gov.bc.ca/mof/Climate_Change/Preparing_for_Climate_Change.pdf.

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-term and a long-term solution. *For. Chron.* 81:704–709.

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 Kuane 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.; Flannigan, M.; Gauthier, S.; Leduc, A.; Lefort, P. 2004. Past, current and future fire frequency in the Canadian boreal forest: implications for sustainable forest management. *Ambio* 33:356–360.

Bergeron, Y.; Leduc, A. 1998. Relationships between change in fire frequency and mortality due to spruce budworm outbreaks in the southeastern Canadian boreal forest. *J. Veg. Sci.* 9:493–500.

Boer, G.J.; Flato, G.; Ramsden, D. 2000. A transient climate change simulation with historical and projected greenhouse gas and aerosol forcing: projected climate for the 21st century. *Clim. Dyn.* 16:427–450.

Bond-Lamberty, B.; Peckham, S.D.; Ahl, D.E.; Gower, S.T. 2007. Fire as the dominant driver of central boreal forest carbon balance. *Nature* 450(7166):89–92.

Bonsal, B.R.; Zhang, X.; Vincent, L.A.; Hogg, W.D. 2001. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada. *J. Clim.* 14:1959–1976.

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. Ministère des richesses naturelles de l'Ontario, Appl. Res. Dev. Branch, Sault Ste. Marie (Ont.). Clim. Chang. Res. Rep. CCRR-08. 50 p.
- Bunn, A.G.; Goetz, S.J.; Fiske, G.J. 2005. Observed and predicted responses of plant growth to climate across Canada. *Geophys. Res. Lett.* 32:L16710. doi: 10.1029/2005GL023646.
- Bunn, A.G.; Goetz, S.J.; Kimball, J.S.; Zhang, K. 2007. Northern high-latitude ecosystems respond to climate change. *Eos Trans. Am. Geophys. Union* 88:333-335.
- Burton, P.J.; Cumming, S.G. 1995. Potential effects of climate change on some western Canadian forests, based on phenological enhancements to a patch model of forest succession. *Water Air Soil Pollut.* 82:401-414.
- Canadell, J.G.; Le Quére, C.; Raupach, M.R.; Field, C.B.; Buitenhuis, E.T.; Ciais, P.; Conway, T.J.; Gillett, N.P.; Houghton, R.A.; Marland, G. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* [en ligne] www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0702737104.
- Candau, J.N.; 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.; Régnière, J.; Logan, J.A.; Taylor, S.W.; Bentz, B.J.; Powell, J.A. 2007. Impacts du changement climatique sur l'expansion de l'aire de répartition du dendroctone du pin ponderosa. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.), Mountain Pine Beetle Initiative Working Paper, Projet 1.02, Work. Pap. 25 p.
- 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 in T.L. Shore, J.E. Brooks et J.E. Stone, éditeurs. *Proc. Mountain pine beetle symposium: challenges and solutions*. 30 et 31 octobre 2003, Kelowna, C.-B.. Ressources naturelles Canada., Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.), Inf. Rep. BC-X-399.
- Caspersen, J.P.; Pacala, S.W.; Jenkins, J.C.; Hurtt, G.C.; Moorcroft, P.R.; Birdsey, R.A. 2000. Contributions of land-use history to carbon accumulation in U.S. forests. *Science* 290(5494) 1148-1151. doi: 10.1126/science.290.5494.1148.
- [CCMF] Conseil canadien des ministres des forêts. 2005. Stratégie canadienne en matière de feux de forêt : Vision pour une approche innovatrice et intégrée pour la gestion des risques. Conseil canadien des ministres des forêts, Ressources naturelles Canada, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alta.).
- [CCMF] Conseil canadien des ministres des forêts. 2006. Critères et indicateurs de l'aménagement durable des forêts au Canada : Bilan national 2005. Conseil canadien des ministres des forêts, Ressources naturelles Canada, Ottawa (Ont.).
- Chapin, F.S., III; Callaghan, T.V.; Bergeron, Y.; Fukuda, M.; Johnstone, J.F.; Juday, G.; Simov, S.A. 2004. Global change and the boreal forest: thresholds, shifting states or gradual change? *Ambio* 33:361-365.
- [CMIAE] Columbia Mountains Institute of Applied Ecology. 2005. Implications of climate change in British Columbia's Southern Interior forests. Columbia Mt. Inst. Appl. Ecol., Revelstoke (C.-B.). [en ligne] http://www.cmiae.org/conferences-past.htm#Implications_of_Climate_Change.
- 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. Impacts of climate change on Ontario's forests. Ministère des richesses naturelles de l'Ontario, Ont. For. Res. Inst., Sault Ste. Marie (Ont.). *For. Res. Inf. Pap.* 143.
- Colombo, S.J.; McKenney, D.W.; Lawrence K.M.; Gray, P.A. 2007. Climate change projections for Ontario: practical information for policymakers and planners. Ministère des richesses naturelles de l'Ontario, Appl. Res. Dev. Branch, Sault Ste. Marie (Ont.). *Clim. Chang. Res. Rep. CCRR-05*. 37 p.
- 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* 51:723-734.
- Danby, R.K.; Hik, D.S. 2007. Variability, contingency and rapid change in recent subarctic 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.
- Dobesberger, E. J. 2002. *Agrilus planipennis*, emerald ash borer. Agence canadienne d'inspection des aliments. Plant Health Risk Assessment Unit, Science Division, Ottawa (Ont.). *Pest Facts Sheet*. 10 p.
- Dore, M.H.I.; Burton, I. 2000. The costs of adaptation to climate change in Canada: a stratified estimate by sectors and regions. [en ligne] http://www.adaptation.nrcan.gc.ca/projdb/index_f.php?class=125.
- Drever, C.R.; Peterson, G.; Messier, C.; Bergeron, Y.; Flannigan, M. 2006. Can forest management based on natural disturbances maintain ecological resilience? *Can. J. For. Res.* 36:2285-2299.

- Easterling, D.R.; Horton, B.; Jones, P.D.; Peterson, T.C.; Karl, T.R.; Parker, D.E.; Salinger, M.J.; Razuvayev, V.; Plummer, N.; Jamason, P.; Folland, C.K. 1997. Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science* 277(5324):364–367. doi: 10.1126/science.277.5324.364.
- Eimers, M.C.; Watmough, S.A.; Buttle, J.M.; Dillon, P.J. 2007. Drought-induced sulphate release from a wetland in south-central Ontario. *Environ. Mon. Assess.* 127:399–407.
- Flannigan, M.D.; Bergeron, Y.; Engelman, O.; Wotton, B.M. 1998. Future wildfire in circumboreal forests in relation to global warming. *J. Veg. Sci.* 9:469–476.
- Flannigan, M.D.; Harrington, J.B. 1988. A study of the relation of meteorological variables to monthly provincial area burned by wildfire in Canada 1953–80. *J. Appl. Meteorol.* 27:441–452.
- Flannigan, M.D.; Logan, K.A.; Amiro, B.D.; Skinner, W.R.; Stocks, B.J. 2005. Future area burned in Canada. *Clim. Chang.* 72:1–16.
- Flannigan, M.D.; Stocks, B.J.; Wotton, B.M. 2000. Forest fires and climate change. *Sci. Total Environ.* 262:221–230.
- Flannigan, M.D.; Van Wagner, C.E. 1991. Climate change and wildfire in Canada. *Can. J. For. Res.* 21:66–72.
- Flato, G.M.; Boer, G.J.; Lee, W.; McFarlane, N.; Ramsden, D.; Reader, M.; Weaver, A. 2000. The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis global coupled model and its climate. *Clim. Dyn.* 16:451–467.
- Fleming, R.A. 1996. A mechanistic perspective of possible influences of climate change on defoliating insects in North America's boreal forests. *Silva Fenn.* 30:281–294.
- Fleming, R.A. 2000. Climate change and insect disturbance regimes in Canada's boreal forests. *World Resour. Rev.* 12(3):520–554.
- 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.
- Forêt modèle de Fundy. 2007. Forest management planning in the face of climate change: impacts and adaptation in the Acadian forest. Résumé de l'atelier. 15 et 16 mai 2007, Fredericton, Nouveau-Brunswick. Forêt modèle de Fundy. Sussex (N.-B.). [en ligne] http://fundymodelforest.net/cms/pdfs/ForestManagementPlanningintheFaceofClimateChange-Summary_2_.pdf
- Foster, N.W.; Hazlett, P.W. 2002. Trends in water chemistry in a maple forest on a steep slope. *Water Air Soil Pollut. Focus* 2:23–36.
- 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.
- (GIEC) Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 2005. Guidance notes for lead authors of the IPCC fourth assessment report on addressing uncertainties [en ligne] http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4_UncertaintyGuidanceNote.pdf.
- Girardin, M.P. 2007. Interannual to decadal changes in area burned in Canada from 1781 to 1982 and the relationship to Northern Hemisphere land temperatures. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 16(5):557–566. doi: 10.1111/j.1466-8238.2007.00321.x.
- 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. Responses of tree growth to a changing climate in boreal central Canada: a comparison of empirical, process-based, and hybrid modelling 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.* 31(18):L18211. doi:10.1029/2004GL020876.
- Glazebrook, J.; Rogers, E.E.; Asubel, F.M. 1997. Use of Arabidopsis for genetic dissection of plant defense responses. *Annu. Rev. Genet.* 31:547–569.
- Goetz, S.J.; Bunn, A.; Fiske, G.; 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 forest ecotone, Ontario, Canada. *Can. J. For. Res.* 35:2709–2718.
- Goodison, B.E. 1978. Accuracy of Canadian snow gage measurements. *J. Appl. Meteorol.* 17:1542–1548.
- Gordon, C.; Cooper, C.; Senior, C.A.; Banks, H.; Gregory, J.M.; Johns, T.C.; Mitchell, J.F.B.; Wood, R.A. 2000. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dyn.* 16:147–168.
- Gordon, H.B.; O'Farrell, S.P. 1997. Transient climate change in the CSIRO coupled model with dynamic sea ice. *Mon. Weather Rev.* 125:875–907.
- Gray, D.R. 2004. The gypsy moth life stage model: landscape-wide predictions of gypsy moth establishment using a multi-generational model. *Ecol. Model.* 176:155–171.
- Gray, D.R. 2008. The relationship between climate and outbreak characteristics of the spruce budworm in eastern Canada. *Clim. Chang.* 87(3–4):361–383.
- Hamann, A.; Wang, T. 2006. Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia. *Ecology* 87(11):2773–2786. doi: 10.1890/0012-9658(2006)87[2773:PEOCCO]2.0.CO;2.

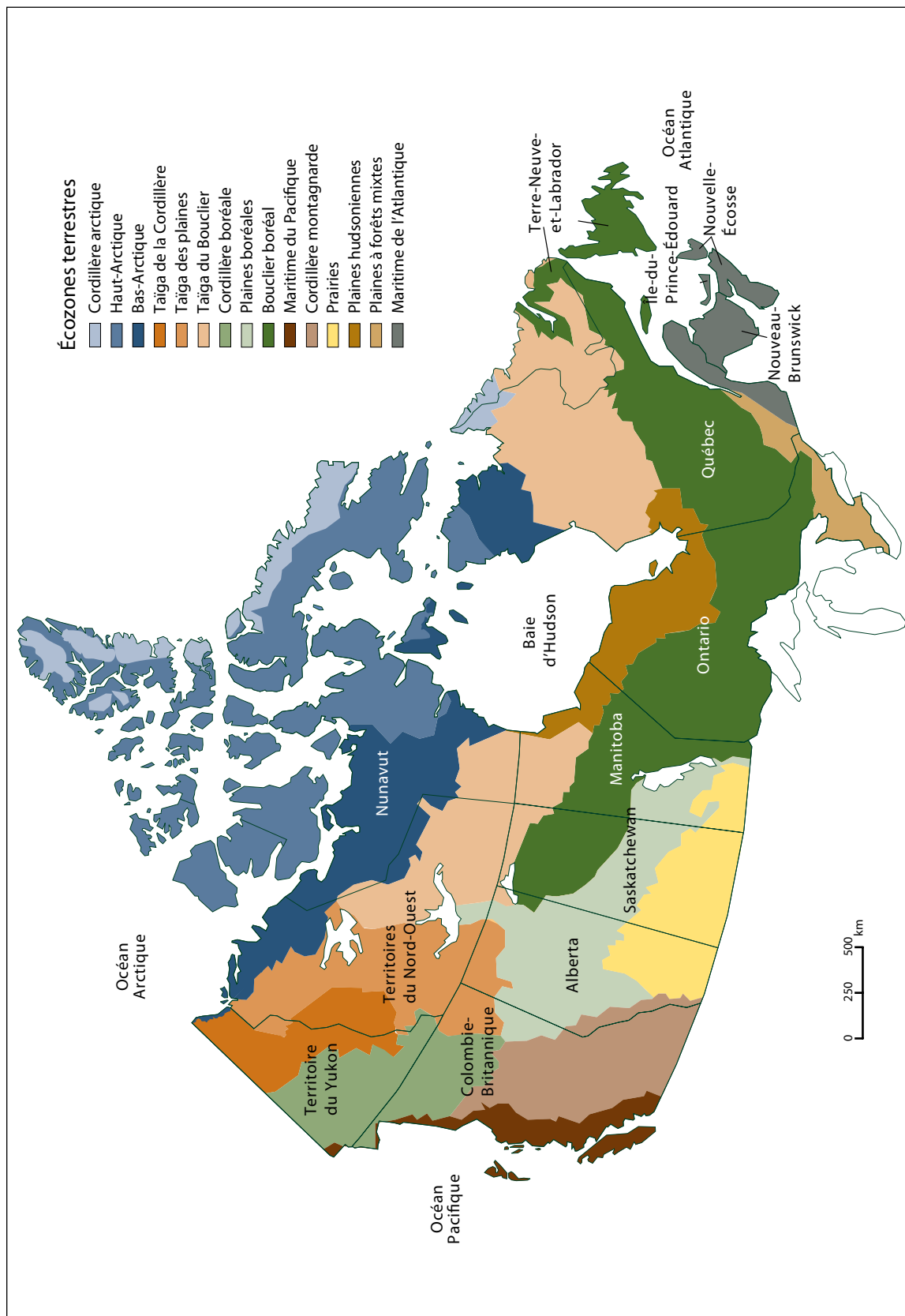
- Hauer, G.; Williamson, T.; Renner, M. 2001. Socioeconomic impacts and adaptive responses to climate change: a Canadian forest sector perspective. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alta.). Information Report NOR-X-373.
- Henderson, N.; Hogg, E.H.; Barrow, E.; Dolter, B. 2002. Climate change impacts on the island forests of the Great Plains and the implications for nature conservation policy: the outlook for Sweet Grass Hills (Montana), Cypress Hills (Alberta-Saskatchewan), Moose Mountain (Saskatchewan), Spruce Woods (Manitoba) and Turtle Mountain (Manitoba-North Dakota). *Prairie Adapt. Res. Collab.*, Univ. Regina, Regina (Sask.). 116 p. [en ligne] http://www.parc.ca/research_pub_forestry.htm.
- Hennon, P.; D'Amore, D.; Wittwer, D.; Johnson, A.; Schaberg, P.; Hawley, G.; Beier, C.; Sink, S.; Juday, G. 2006. Climate warming, reduced snow, and freezing injury could explain the demise of yellow-cedar in Southeast Alaska, USA. *World Resour. Rev.* 18:427-450.
- 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. 1997. Temporal scaling of moisture and the forest-grassland boundary in western Canada. *Agric. For. Meteorol.* 84:115-122.
- Hogg, E.H.; Bernier, P.Y. 2005. Climate change impacts on drought-prone forests in western Canada. *For. Chron.* 81:675-682.
- 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.; 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 a regional drought on the productivity, dieback and biomass of western Canadian aspen forests. *Can. J. For. Res.* Forthcoming.
- Hogg, E.H.; Wein, R.W. 2005. Impacts of drought on forest growth and regeneration following fire in southwestern Yukon, Canada. *Can. J. For. Res.* 35:2141-2150.
- Houlder, D.J.; Hutchinson, M.F.; Nix, H.A.; McMahon, J.P. 2000. ANUCLIM User's Guide, Version 5.1. *Cent. Resour. Environ. Stud.*, Aust. Natl. Univ., Canberra, Australia.
- Hutchinson, M.F. 2004. ANUSPLIN Version 4.3. *Aust. Natl. Univ., Cent. Resour. Environ. Stud.*, Canberra, Australia. [en ligne] <http://cres.anu.edu.au/outputs/anusplin.php>.
- Inkley, D.B.; Anderson, M.G.; Blaustein, A.R.; Burkett, V.R.; Felzer, B.; Griffith, B.; Price, J.; Root, T.L. 2004. Global climate change and wildlife in North America. *Wildl. Soc., Bethesda, MD. Tech. Rev.* 04-2.
- Irland, L. C.; Adams, D.; Alig, R.; Betz, C.J.; Chi-Chung, C.; Hutchins, M.; McCarl, B.A.; Skog, K.; Sohngen, B.L. 2001. Assessing socioeconomic impacts of climate change on US Forests, wood-product markets, and forest recreation. *Bioscience* 51:9.
- Johnson, W.T.; Lyon, H.H. 1988. *Insects that feed on trees and shrubs*. 2^e éd. Cornell Univ. Press. Ithaca, NY. 556 p.
- Johnstone, J.F.; Chapin, F.S. 2003. Non-equilibrium succession dynamics indicate continued northern migration of lodgepole pine. *Glob. Chang. Biol.* 9:1401-1409.
- 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. *BIOCAP Res. Integr. Program Synth. Pap.*, Queens Univ., Kingston (Ont.). [en ligne] <http://www.biocap.ca/index.cfm?meds=category&category=29>.
- Johnston, M.; Williamson, T. 2007. A framework for assessing climate change vulnerability of the Canadian forest sector. *For. Chron.* 83:358-361.
- Kasischke, E.S.; Turetsky, M.R. 2006. Recent change in the fire regime across the North American boreal region—spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska. *Geophys. Res. Lett.* 33:L09703. doi: 10.1029/2006GL025677.
- Kirilenko, A.P.; Sedjo, R.A. 2007. Climate change impacts on forestry. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* doi: 10.1073/pnas.0701424104 (aussi accessible en ligne).
- 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* 309:1360-1362.
- Kurz, W.A.; Apps, M.J.; Stocks, B. J.; Volney, W.J.A. 1995. Global climatic change: disturbance regimes and biospheric feedbacks of temperate and boreal forests. Pages 119-133 in G.F. Woodwell and F. Mackenzie, éditeurs. *Biospheric feedbacks in the global climate system: will the warming feed the warming?* Oxford Univ. Press. New York, NY.
- Kurz, W.A.; Apps, M.J. 1999. A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector. *Ecol. Appl.* 9:526-547.
- Kurz, W.A.; Stinson, G.; Rampley, G. 2007. Could increased boreal forest ecosystem productivity offset carbon losses from increased disturbances? *Philos. Trans. R. Soc. Land. B. Biol. Sci.* doi:10.1098/rstb.2007.2198 (aussi accessible en ligne).
- Kurz, W.A.; Stinson, G.; Rampley, G.; Dymond, C.; Neilson, E. 2008. Risk of natural disturbances makes future contribution of Canada's forests to the global carbon cycle highly uncertain. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 105:1551-1555.
- Laroque, C.P.; Smith, D.J. 2005. Predicted short-term radial-growth changes of trees based on past climate on Vancouver Island, British Columbia. *Dendrochronologia* 22:163-168.

- Larsson, S. 1989. Stressful times for the plant stress-insect performance hypothesis. *Oikos* 56:277–283.
- Lemieux, C.J.; Scott, D.J.; Gray, P.A.; Davis, R.G. 2007. Climate change and Ontario's provincial parks: towards an adaptation strategy. Ministère des richesses naturelles de l'Ontario., Appl. Res. Dev. Branch, Sault Ste. Marie (Ont.). *Clim. Chang. Res. Rep. CCRR-06*. 82 p.
- Lemmen, D.S.; Warren, F.J., éditeurs. 2004. Impacts et adaptation liés au changement climatique : perspective canadienne. Ressources naturelles Canada, Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements, Ottawa (Ont.). [en ligne] http://adaptation.nrcan.gc.ca/perspective/index_f.php.
- Lemmen, D.S.; Warren, F.J.; Lacroix, J.; Bush, E., éditeurs. 2008. Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007. Gouv. Canada, Ottawa (Ont.). 448 p. [en ligne] http://www.adaptation.nrcan.gc.ca/assess/2007/index_f.php.
- Lloyd, A.H.; Bunn, A.G. 2007. Responses of the circumpolar boreal forest to 20th century climate variability. *Environ. Res. Lett.* 2. 045013. 13 p. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045013.
- Loehle, C. 2003. Competitive displacement of trees in response to environmental change or introduction of exotics. *Environ. Manag.* 32:106–115.
- Loehle, C.; Leblanc, D. 1996. Model-based assessments of climate change effects on forests: a critical review. *Ecol. Model.* 90:1–30.
- Logan, J.A.; Régnière, J.; Powell, J.A. 2003. Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics. *Front. Ecol. Environ.* 1:130–137.
- Lupo, A.R.; Oglesby, R.J.; Mokhov, I.I. 1997. Climatological features of blocking anticyclones: a study of the Northern Hemisphere CCM1 model blocking events in present-day and double CO₂ concentration atmosphere. *Clim. Dyn.* 13:181–195.
- MacIver, D.C.; Street, R.B.; Auclair, A.N., éditeurs. 1989. Climate applications in forest renewal and forest production proceedings of forest climate '86. 17–20 novembre 1986, Geneva Park, Orillia, Ontario. Service canadien des forêts, Ottawa (Ont.).
- Mackey, B.G.; McKenney, D.W.; Yang, Y.; McMahon, J.P.; Hutchinson, M.F. 1996. Site regions revisited: a climatic analysis of Hills' site regions for the province of Ontario using a parametric method. *Can. J. For. Res.* 26:333–354.
- Marmorek, D.R.; Robinson, D.C.E.; Murray, C.; Greig, L. 2006. Enabling adaptive forest management – Final Report. Prepared for the National Commission on Science for Sustainable Forestry by ESSA Technologies Ltd., Vancouver (C.-B.). 94 p.
- Mattson, W.J.; Haack, R.A. 1987. The role of drought in outbreaks of plant-eating insects. *Bioscience* 37:110–118.
- McKenney, D.W.; Pedlar, J.H.; Papadopol, P.; Hutchinson, M.F. 2006a. The development of 1901–2000 historical monthly climate models for Canada and the United States. *Agric. For. Meteorol.* 138:69–81.
- McKenney, D.W.; Price, D.; Papadopol, P.; Siltanen, M.; Lawrence, K. 2006b. High-resolution climate change scenarios for North America. *Can. For. Serv., Sault Ste. Marie (Ont.). Front Line Tech. Note* 107.
- 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* 57:939–948.
- McLachlan, J.S.; Clark, J.S.; Manos, P.S.; Paul, S. 2005. Molecular indicators of tree migration capacity under rapid climate change. *Ecology* 86:2088–2098.
- Medlyn, B.E.; Badeck, F.W.; DePury, D.G.G.; Barton, C.V.M.; Broadmeadow, M.; Ceulemans, R.; de Angelis, P.; Forstreuter, M.; Jach, M.E.; Kellomäki, S.; Laitat, E.; Marek, M.; Philippot, S.; Rey, A.; Strassmeyer, J.; Laitinen, K.; Liozon, R.; Portier, B.; Roberntz, P.; Wang, K.; Jarvis, P.G. 1999. Effects of elevated [CO₂] on photosynthesis in European forest species: a meta-analysis of model parameters. *Plant Cell Environ.* 22:1475–1495.
- Metz, P.; Davidson, O.R.; Bosch, P.R.; Dave, R.; Meyer, L.A., éditeurs. 2007. Climate change 2007: mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. [en ligne] <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg2.htm>.
- Michels, A.; Laird, K.R.; Wilson, S.E.; Thomson, D.; Leavitt, P.R.; Oglesby, R.J.; Cumming, B.F. 2007. Multidecadal to millennial-scale shifts in drought conditions on the Canadian prairies over the past six millennia: implications for future drought assessment. *Glob. Chang. Biol.* 13:1295–1307.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and human well-being: synthesis. Island Press, Washington, DC. 155 p.
- Monserud, R.A.; Yang, Y.; Huang, S.; Tchebakova, N. 2008. Potential change in lodgepole pine site index and distribution under climate change in Alberta. *Can. J. For. Res.* 38:343–352.
- Murray, C.; Marmorek, D.R. 2004. Adaptive management: a science-based approach to managing ecosystems in the face of uncertainty. In N.W.P. Munro, T.B. Herman, K. Beazley et P. Dearden, éditeurs. Making ecosystem-based management work. Proceedings of the Fifth International Conf. on Science and Management of Protected Areas. Victoria, C.-B..11–16 mai 2003. Science and Management of Protected Areas Association, Wolfville (N.-É.) [en ligne] http://www.essa.com/downloads/AM_paper_Fifth_International_SAMPAA_Conference.pdf.

- Nakicenovic, N.; Swart, R., éditeurs. 2000. Special report on emissions scenarios. A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. [en ligne] <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.htm>.
- 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(50):18052–18056.
- NRCan – OMNR. 2007. Climate change adaptation — workshop results. Canada-Ontario Memorandum of Understanding Concerning Cooperation in Forestry. 25 septembre 2007, Sault Ste. Marie (Ont.).
- Ogden, A.E.; Innes, J.L. 2007a. Incorporating climate change adaptation considerations into forest management planning in the boreal forest. *Int. For. Rev.* 9(3):713–733.
- Ogden, A.E.; Innes, J.L. 2007b. Perspectives of forest practitioners on climate change adaptation in the Yukon and Northwest Territories of Canada. *For. Chron.* 83:557–569.
- 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.
- Oliver, C.D.; Larson, B.C. 1996. *Forest stand dynamics*. Update Ed. John Wiley and Sons, New York, NY. 519 p.
- Parker, W.C. 1998. Répercussions du changement climatique sur les forêts de l'Ontario. Pages 33–36 in S.J. Colombo et L.J. Buse, éditeurs. Ministère des richesses naturelles de l'Ontario, Ont. For. Res. Inst. Sault Ste. Marie, ON. For. Res. Inf. Pap. 143.
- Parkins, J.R.; MacKendrick, N.A. 2007. Assessing community vulnerability: a study of the mountain pine beetle outbreak in British Columbia, Canada. *Glob. Environ. Chang.* 17:460–471.
- Parry, M.L.; Canziani, O.F.; Palutikof, J.P.; van der Linden, P.J.; Hanson, C.E., éditeurs. 2007. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. [en ligne] <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg3.htm>.
- Payette, S. 1993. The range limit of boreal tree species in Quebec-Labrador: and ecological and paleoecological interpretation. *Rev. Paleobot. Palynol.* 79:7–30.
- Payette, S.N.; Bhiry, A.; Delwaide, A.; Simard, M. 2000. Origin of the lichen woodland at its southern range limit in eastern Canada: the catastrophic impact of insect defoliators and fire on the spruce-moss forest. *Can. J. For. Res.* 30:288–305.
- 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.
- Price, C.; Rind, D. 1994. The impact of a 2×CO₂ climate on lightning-caused fires. *J. Clim.* 7:1484–1494.
- 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. Pattern and process of regeneration in gap models: priority issues for studying forest responses to climate change. *Clim. Chang.* 51:475–508.
- Rapport, D.J.; Whitford, W.G. 1999. How ecosystems respond to stress. *Bioscience* 49:193–203.
- Raulier, F.; Bernier, P.Y. 2000. Predicting the date of leaf emergence for sugar maple across its native range. *Can. J. For. Res.* 30:1429–1435.
- Ravindranath, N.H. 2007. Mitigation and adaptation synergy in the forest sector. *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Chang.* 12:843–853.
- Rehfeldt, G.E.; Ying, C.C.; Spittlehouse, D.L.; Hamilton, D.A., Jr. 1999. Genetic responses to climate in *Pinus contorta*: niche breadth, climate change, and reforestation. *Ecol. Monogr.* 1999:375–407.
- Reich, P.B.; Hungate, B.A.; Luo, Y. 2006. Carbon-nitrogen interactions in terrestrial ecosystems in response to rising atmospheric carbon dioxide. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 37:611–636. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110039.
- Royama, T. 1992. *Analytical population dynamics*. Chapman and Hall, London, UK. 371 p.
- Safranyik, L.; Shrimpton, D.M.; Whitney, H.S. 1975. An interpretation of the interaction between lodgepole pine, the mountain pine beetle and its associated blue stain fungi in western Canada. Pages 406–428 in D.M. Baumgartner, éditeur. *Management of lodgepole pine ecosystems*. Washington State Univ. Coop. Ext. Serv., Pullman, WA.
- SAS Institute Inc. 2000. *SAS user's guide: statistics*. Release 8.02. SAS Inst. Inc., Cary, NC.
- Savva, Y.; Denner, B.; Koubaa, A.; Tremblay, F.; Bergeron, Y.; Tjoekler, 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.
- Schiff, S.; Spoelstra, J.; Semkin, R.; Jeffries, D. 2005. Drought induced pulses of SO₄²⁻ from a Canadian Shield wetland: use of δ³⁴S and δ¹⁸O in SO₄²⁻ to determine sources of sulfur. *Appl. Geochem.* 20:691–700.
- Schindler, D.W.; Donahue, W.F. 2006. An impending water crisis in Canada's western prairie provinces. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 103:7210–7216.
- Scott, D.; Lemieux, C. 2005. Climate change and protected area policy and planning in Canada. *For. Chron.* 81:696–703.
- Scott, D.; Lemieux, C. 2007. Climate change and protected areas policy, planning and management in Canada's boreal forest. *For. Chron.* 83:347–357.

- Sevruk, B. 1982. Methods of correction for systematic error in point precipitation measurement for operational use. *World Meteorol. Organ., Genève, Suisse. Oper. Hydrol. Rep.* 21. 91 p.
- Shore, T. L.; Safranyik, L.; Lemieux, J. P. 2000. Susceptibility of lodgepole pine stands to the mountain pine beetle: testing of a rating system. *Can. J. For. Res.* 30:44–49.
- Skinner, W.R.; Flannigan, M.D.; Stocks, B.J.; Martell, D.L.; Wotton, B.M.; Todd, J.B.; Mason, J.A.; Logan, K.A.; Bosch, E.M. 2001. A 500 hPa synoptic wildland fire climatology from large Canadian forest fires, 1959–1996. *Theor. Appl. Climatol.* 71:(3–4):157–169. doi:10.1007/S007040200002.
- Skinner, W.R.; Stocks, B.J.; Martell, D.L.; Bonsal, B.; Shabbar, A. 1999. The association between circulation anomalies in the mid-troposphere and area burned by wildland fire in Canada. *Theor. Appl. Climatol.* 63:89–105.
- Smit, B.; Pilifosova, O. 2001. Adaptation to climate change in the context of sustainable development and equity. Pages 876–912 in 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, G.A.; Humble, L.M. 2000. The brown spruce longhorn beetle. *Exotic Forest Pest Advisory No. 5*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria, (C.-B.), 4 p.
- 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., III; Stackhouse, P.W., Jr. 2006. Climate-induced boreal forest change: predictions versus current observations. *Glob. Planet. Chang.* 56(3–4):274–296. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.07.028.
- Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Marquis, M.; Averyt, K.; Tignor, M.M.B.; Miller, H.L., Jr.; Chen, Z., éditeurs. 2007. *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. [en ligne] <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>.
- Spittlehouse, D.L.; Stewart, R.B. 2003. Adaptation to climate change in forest management. *BC J. Ecosyst. Manag.* 4:1–11.
- Spittlehouse, D.L. 2005. Integrating climate change adaptation into forest management. *For. Chron.* 81:691–695.
- Spittlehouse, D.L. 2008. Climate change, impacts, and adaptation scenarios: climate change and forest and range management in British Columbia. B.C. Min. For. Range, Res. Br., Victoria, B.C. Tech. Rep. 045. [en ligne] <http://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/Tr/Tr045.htm>.
- Stankey, G.H.; Clark, R.N.; Bormann, B.T. 2005. *Adaptive management of natural resources: theory, concepts, and management institutions*. U.S. Dep. Agric., For. Serv., Pac. Northwest Res. Stn., Portland, OR. PNW-GTR-654. 73 p.
- Stern, N. 2007. *The economics of climate change: the stern review*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- 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.* 108(DI):8149. doi:10.1029/2001JD000484.
- Thompson, I.D.; Flannigan, M.D.; Wotton, B.M.; Suffling, R. 1996. The effects of climate change on landscape diversity: an example in Ontario forests. *Environ. Assess. Monit.* 49:213–233.
- 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. Ministère des richesses naturelles de l'Ontario, Appl. Res. Dev. Branch, Sault. Ste. Marie (Ont.). *Clim. Chang. Res. Rep. CCRR-09*. 47 p.
- Vincent, L.; Mekis, É. 2006. Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the twentieth century. *Atmos.-Ocean* 44(2):177–193.
- Volney, W.J.A.; Fleming, R.A. 2000. Climate change and impacts of boreal forest insects. *Agric. Ecosyst. Environ.* 82:283–294.
- 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, N.L.; Masters, G.J. 2007. Linking climate change and species invasion: an illustration using insect herbivores. *Glob. Chang. Biol.* 13:1605–1615.
- Weber, M.G.; Flannigan, M.D. 1997. Canadian boreal forest ecosystem structure and function in a changing climate: impacts on fire regimes. *Environ. Rev.* 5:145–166.
- White, T.C.R. 1984. The abundance of invertebrate herbivores in relation to the availability of nitrogen in stressed foods. *Oecologia* 63:90–105.
- Wilf, P.; Labandeira, C.C. 1999. Response of plant-insect associations to Paleocene-Eocene warming. *Science* 284:2153–2156.
- Williamson, T.; Hirsch, K.; Frenkel, B. 2006. Adapting to climate change: Issues and challenges for BC's forest based communities. *BC Forest Professional (Assoc. BC For. Prof.)* 13(5):20–21.

- Williamson, T.B.; Parkins, J.R.; McFarlane, B.L. 2005. Perceptions of climate change risk to forest ecosystems and forest-based communities. *For. Chron.* 81:710–716.
- 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. *Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alta.) Inf. Rep. NOR-X-414.*
- Wolfe, D.W.; Schwartz, M.D.; Lakso, A.N.; Otsuki, J.; Pool, R.M.; Shaulis, N.J. 2005. Climate change and shifts in spring phenology of three horticultural woody perennials in northeastern USA. *Int. J. Biomet.* 49:303–309.
- 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. 2008. Interpreting and using outputs from the Canadian Forest Fire Danger Rating System in research applications. *Environ. Ecol. Stat.* doi 10.1007/s10651-007-0084-2. (aussi accessible en ligne).
- Wotton, B.M.; Flannigan, M.D. 1993. Length of the fire season in a changing climate. *For. Chron.* 69:187–192.
- Wotton, B.M.; Logan, K.A.; McAlpine, R.S. 2005. Climate change and the future fire environment in Ontario: fire occurrence and fire management impacts. *Ministère des richesses naturelles de l'Ontario, Sault Ste. Marie (Ont.). Clim. Res. Rep. CCRR-01.* 32 p.
- Wotton, B.M.; Martell, D.M.; Logan, K.A. 2003. Climate change and people-caused forest fire occurrence in Ontario. *Clim. Chang.* 60:275–295.
- Zhang, X.; Hogg, W.D.; Mekis, É. 2001. Spatial and temporal characteristics of heavy precipitation events over Canada. *J. Clim.* 14:1923–1936.
- Zhang, X.; Vincent, L.; Hogg, W.D.; Niitsoo, A. 2000. Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century. *Atmos.-Ocean* 38:395–429.
- 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.
- Zhou, M.; Liang, J.; Buongiorno, J. 2008. Adaptive versus fixed policies for economic or ecological objectives in forest management. *For. Ecol. Manag.* 254:178–187.



Annexe 1. Écozones terrestres du Canada. Source : Groupe de travail sur la stratification écologique 1996. Cadre écologique national pour le Canada. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Cent. de rech. sur les terres et les ress. biol., et Environnement Canada, Dir. gén. de l'état de l'environ. Ottawa (Ont.), 144 p. Reimpression autorisée.

ANNEXE 2

RENSEIGNEMENTS SUR LES TENDANCES CLIMATIQUES

Pour examiner les tendances climatiques actuelles, nous avons utilisé des modèles spatiaux comme ceux décrits par McKenney et coll. (2006a). Les données issues de stations climatologiques (température minimale, température maximale et précipitations) ont été obtenues à partir de sources canadiennes et américaines pour la période entre 1901 et 2003. Les modèles ont été générés à l'aide de ANUSPLIN (Hutchinson 2004), qui utilise une technique multidimensionnelle de lissage par plans affines (une technique d'ajustement de courbe non paramétrique) pour développer des modèles climatiques spatialement continus (p. ex. des cartes), puisque le problème réside dans le fait que le climat est enregistré à des emplacements peu nombreux et dispersés dans tout le pays mais qu'il faut des estimations fiables pour l'ensemble des paysages. Pour les besoins de cette étude, ces modèles ont été exécutés pour donner des estimations sur une grille standard à résolution d'environ 10 km. Pour les principales variables climatiques, 29 indices bioclimatiques annuels supplémentaires (tableau A2.1) ont été générés à l'aide de ANUCLIM (Houlder et coll. 2000) et de SEEDGROW (Mackey et coll. 1996). Les variables climatiques qui nous intéressaient ont été superposées aux cartes d'écozones et aux cartes provinciales, et les valeurs moyennes ont été calculées pour chaque combinaison de province et d'écozone. Nous avons choisi de montrer qu'un certain nombre de variables dans ce rapport, faute d'espace.

Les tendances historiques pour la variable climatique étudiée sont fondées sur une régression linéaire entre l'année et la variable pour la période entre 1950 et 2003. Nous avons utilisé les données pour cette période parce que les données avant 1950 sont rares dans la majeure partie du Canada, surtout dans les écozones nordiques. Nous avons utilisé un modèle autorégressif pour corriger la corrélation propre dans le terme d'erreur (SAS Institute Inc. 2000). L'ordre du modèle autorégressif pour chaque variable climatique a été déterminé à l'aide d'une élimination arrière en commençant par le 12^e modèle autorégressif. Nous recommandons la prudence concernant l'interprétation de ces tendances, car les données des stations climatologiques que nous avons utilisées pour générer les surfaces n'ont pas toutes été calibrées pour assurer une haute cohérence temporelle comme c'est le cas dans les études de tendances fondées sur les données de stations individuelles (p. ex. Vincent et Mekis 2006). Cependant, il y existe un compromis important entre le nombre de stations et la robustesse des modèles spatiaux : plus le nombre de stations est élevé, plus les résultats des modèles spatiaux sont meilleurs, même s'il est possible qu'il y ait des problèmes avec les données de certaines stations qui n'ont pas été vérifiées en profondeur (p. ex. erreurs de coordonnées de l'emplacement et erreurs d'enregistrement).

Tableau A2.1. Variables provenant des principales surfaces climatiques. Les variables 1–19 proviennent de ANUCLIM (Houlder et coll. 2000); les variables 20–29 proviennent de SEEDGROW (Mackey et coll. 1996).

Variable	Description
1 Température moyenne annuelle	Moyenne arithmétique (MA) des températures moyennes mensuelles
2 Amplitude quotidienne moyenne diurne	MA des amplitudes des températures mensuelles
3 Isothermie	#2 ÷ #7
4 Saisonnalité de la température	Écart-type des températures moyennes mensuelles estimatives, en termes de pourcentage de leur moyenne
5 Température maximale pendant la période la plus chaude	Température maximale de la période la plus chaude
6 Température minimale de la période la plus froide	Température mensuelle la plus froide
7 Amplitude annuelle de la température	#5 – #6
8 Température moyenne du trimestre le plus humide	MA de la température des 3 mois les plus humides
9 Température moyenne du trimestre le plus sec	MA de la température des 3 mois les plus secs
10 Température moyenne du trimestre le plus chaud	MA de la température des 3 mois les plus chauds
11 Température moyenne du trimestre le plus froid	MA de la température des 3 mois les plus froids
12 Précipitations annuelles	Total des niveaux mensuels de précipitations
13 Précipitations de la période la plus humide	Précipitations du mois le plus humide
14 Précipitations de la période la plus sèche	Précipitations du mois le plus sec
15 Saisonnalité des précipitations	Écart-type des précipitations estimatives mensuelles, en termes de pourcentage de leur moyenne
16 Précipitations du trimestre le plus humide	Total des précipitations des 3 mois les plus humides
17 Précipitations du trimestre le plus sec	Total des précipitations des 3 mois les plus secs
18 Précipitations du trimestre le plus chaud	Total des précipitations des 3 mois les plus chauds
19 Précipitations du trimestre le plus froid	Total des précipitations des 3 mois les plus froids
20 Début de la saison de croissance	Date julienne lorsque la température moyenne quotidienne est plus élevée que ou égale à 5 °C pendant 5 jours consécutifs
21 Fin de la saison de croissance	Date julienne après le 1 ^{er} août lorsque la température minimale atteint <–2 °C
22 Durée de la saison de croissance	#21 – #20
23 Total des précipitations pour la période 1	Total des précipitations pendant les 3 mois antérieurs au début de la saison de croissance

Tableau A2.1. suite

Variable	Description
24 Total des précipitations pour la période 3	Total des précipitations pendant la période de croissance
25 Degrés-jours de la période 3	Température moyenne quotidienne (°C) moins 5 °C; calculée pour chaque jour de la saison de croissance
26 Température minimale annuelle	MA des températures minimales mensuelles
27 Température maximale annuelle	MA des températures maximales mensuelles
28 Température moyenne pour la période 3	MA des températures pendant la saison de croissance
29 Échelle de température pour la période 3	Température maximale moins la température minimale pendant la période de croissance

Nota : Les renseignements pour les variables 1, 5, 6, 12 et 25 sont fournis dans ce rapport.