

INTRODUCTION

NE Forests 2100: A Synthesis of Climate Change Impacts on Forests of the Northeastern US and Eastern Canada

Human activities such as the combustion of fossil fuels and changes in land use are increasing atmospheric concentrations of carbon dioxide and other greenhouse gases (e.g., nitrous oxide, methane, halocarbons). Climate models indicate that these heat-trapping gases are likely to increase the Earth's average surface air temperature by 1.1 to 6.4 °C by the end of the twenty-first century, depending on a complex array of future emission scenarios, land management, and various positive and negative feedback mechanisms (IPCC 2007). Some increases in air temperature have already occurred, with instrumental observations showing a rise of 0.75 °C in the global average temperature over the last 100 years (IPCC 2007). Observed changes in precipitation (i.e., quantity, frequency, intensity, type) have accompanied air temperature increases, and shifts in precipitation patterns are expected to continue in the future. These changes in climate will undoubtedly have myriad effects on terrestrial ecosystems, with some early indicators of change already being observed. It is difficult to comprehensively predict the ecological consequences of climate change because of the complex interactions and numerous feedbacks involved. Previously, much research on climate change responses has been done in independent, isolated experiments, with little emphasis on synthesis. An integrated approach that examines results across disciplines is required to more fully evaluate responses and reduce the uncertainty of future projected change.

This cross-disciplinary method of analysis is being applied to forest ecosystems of northeastern North America by a coalition of US and Canadian scientists as part of an initiative called *NE Forests 2100*. The goal of *NE Forests 2100* is to gather and synthesize scientific findings from climate change research on forest ecosystems in the region. This unique, international collaboration draws together scientists with different areas of expertise, to put together a more complete picture of potential regional climate change effects. The work also identifies information gaps and offers suggestions on how these might be addressed through future studies. In addition to providing information to researchers, a key aspect of *NE Forests 2100* is to convey scientific findings to the broader community. Results of this analysis will be distilled and disseminated to land managers, government officials, environment and energy agencies, and other stakeholders to provide clear and concise information on which to base strategic management and policy decisions.

The geographical region covered by *NE Forests 2100* is seven states in the northeastern United States (Connecticut, Maine, Massachusetts, New Hampshire, Rhode Island, Vermont, and New York) and the five eastern Canadian provinces (New Brunswick, Newfoundland and Labrador, Nova Scotia, Prince Edward Island, Quebec). Forests in this region are some of the most intensively studied terrestrial ecosystems in the world, providing a wealth of information and data on which to base this synthesis. Regionally, there is a pressing need for information on climate change effects because policy makers are in the process of developing policies and programs that aim to reduce greenhouse gas emissions. In addition to indi-

vidual climate change action plans, cooperative efforts such as the Regional Greenhouse Gas Initiative and the New England Governors and Eastern Canadian Premiers Climate Change Action Plan aim to control greenhouse gas emissions across state, provincial, and national borders. Although climate change policy ultimately requires global solutions, these individual regional efforts are making advances and demonstrate a commitment to action.

Historical records indicate that climate in northeastern North America has already begun to change. Air temperature in the northeastern United States has increased by an average of about 1 °C over the last century (compared with the global increase of 0.75 °C), with greater increases during winter than summer (Trombulak and Wolfson 2004; Hayhoe et al. 2007). Precipitation has also increased over time, although the trend is more difficult to distinguish than that for air temperature because of the greater interannual variability. Nevertheless, significant precipitation increases of about 10 mm/decade have been observed in the northeastern United States during the twentieth century (Keim et al. 2005; Hayhoe et al. 2007). The nature and pattern of precipitation are also changing, with more precipitation occurring as rain and less as snow, increased rainfall intensity and frequency of larger storms, and longer duration of dry periods between storms (summarized in Huntington et al. 2009). These changes in temperature and precipitation impact a range of other meteorological, hydrological, and biophysical variables, and are affecting forest ecosystems in diverse ways.

Until recently, projected trends in climate have been lacking at the regional scale, which, in turn, has hampered efforts to simulate local future environmental responses. Historically, most climate projections have been generated from coupled atmosphere–ocean general circulation models (AOGCMs), which produce spatially coarse (>100 km) global data that are insufficient for regional and local applications. AOGCM data are particularly inadequate in areas like northeastern North America where there is fine-scale climate variation due to factors such as heterogeneous topography, mixed land uses, and coastal influences. The advent of new techniques for deriving finer spatial resolution data from AOGCMs has vastly reduced the uncertainty of regional climate projections. New methods that employ statistical and dynamic downscaling have recently been applied to northeastern North America (Plummer et al. 2006; Hayhoe et al. 2007, 2008), providing valuable input to models that simulate forest ecosystem responses to climate change.

NE Forests 2100 draws heavily on twenty-first century climate projections developed for the northeastern United States by Hayhoe et al. (2007, 2008). These projections are based on output from the latest AOGCMs available from the Intergovernmental Panel on Climate Change database (IPCC 2007), and use statistical downscaling procedures for improving the spatial and temporal resolution. Regional projections suggest that the average annual air temperature will increase by 2.1 to 5.3 °C by 2100, depending on future emissions levels and differences among AOGCMs. Seasonally, winter temperatures are projected to increase more than summer temperatures until the last few decades of the twenty-first century, when seasonal increases are projected to be similar. Precipitation projections are more uncertain, but indicate annual and winter increases of 7%–14% and 12%–30%, respectively,

with little change in summer precipitation. While these results are only applicable to the northeastern United States, Plummer et al. (2006) had comparable results for eastern Canada based on dynamic downscaling using a regional climate model. Confidence in these recent climate projections is greater than for past projections, providing a sounder basis for examining climate effects across northeastern North America.

Forest ecosystems of northeastern North America host a rich diversity of plant and animal life that could potentially be affected by climate change. Some species may benefit from climate change, whereas others may not. Shifts in the current range of organisms will alter the ability of these ecosystems to provide the wide array of benefits on which the region has become reliant. Both northern hardwood and boreal and sub-boreal spruce–fir dominated forests are the dominant land cover types in northeastern North America. These ecosystems support the forest industry by providing commodities such as pulp and paper, biofuels, and food products. These forests also provide numerous services such as clean air and water, flood reduction, biodiversity, carbon sequestration, wildlife habitat, recreation and tourism, and more intangible aesthetic benefits. If climate change were to extensively alter the ability of these ecosystems to provide the goods and services the region has become reliant on, it could have substantial social and economic impacts, ultimately affecting the quality of life in the region.

In this special section of *Canadian Journal of Forest Research*, we present five review papers based on current research that complement the work by Iverson et al. (2008) and Ollinger et al. (2008). Collectively, these papers show that changes in both longer term climatic patterns and shorter term weather variability will have substantial consequences for the forested ecosystems of northeastern North America.

The first paper (Huntington et al. 2009) reviews past and projected changes in climate and hydrology for northeastern North America. The paper also briefly discusses the potential implications of these changes for forests ecosystems, including forest composition, drought, fire, snow and frost dynamics, major storms, and changes in river dynamics. The second paper (Mohan et al. 2009) considers the effects of climate on forest composition and productivity, with an emphasis on the potential rate of change and interacting vectors of change. This paper also examines factors contributing to historical forest dieback and decline in the region. The third paper (Dukes et al. 2009) focuses on forest pests, pathogens, and invasives, collectively termed “nuisance species”. These species have the potential to rapidly and profoundly affect the nature and composition of forest ecosystems, particularly in conjunction with events such as drought, wind and ice storms, and fire. The fourth paper (Rodenhouse et al. 2009) synthesizes information on climatic effects on forest wildlife, with an emphasis on mammals, amphibians, birds, and insects. Several charismatic species are used as case studies to illustrate how climate impacts wildlife, along with the identification of several surprising results. The final paper (Campbell et al. 2009) analyzes the complex cascade of events arising from climate-induced changes in forest nutrient pools and cycling. A forest ecosystem model is used to illustrate how climate change may affect biogeochemical cycling.

Although each paper tackles a different aspect of climate effects on northern forest ecosystems, several common themes emerge that highlight the complexity of potential change, making it difficult to predict responses. These are described in detail in the separate papers and include

- direct versus indirect effects
- positive versus negative feedbacks

- multiple, interacting drivers of change, with climate being just one of many drivers
- effects that have cascading consequences through multiple components of forest ecosystems
- varying time scales of response, from seconds to millennia
- nonlinear effects and threshold responses
- time lags and legacy effects in responses
- temporal and spatial heterogeneity in responses across the complex landscape of the region
- surprises and unexpected outcomes
- highly variable species specific responses (i.e., no change, “winners”, “losers”)
- the influence of human factors, such as changes in energy consumption, land use, and forest management, affecting the magnitude and direction of responses

All of these factors lead to an unavoidable uncertainty associated with the response of northern forest ecosystems to climate change. Despite these uncertainties, it is the consensus of this group of scientists that sufficient evidence exists that anthropogenic influences on climate and their ecological consequences have changed over the last century, are currently changing, and will continue to change for the foreseeable future. Despite this, sufficient research and understanding are available to aid policy makers, land managers, and the concerned public to help mitigate and adapt to current and future changes in the forest ecosystem. Resources (financial, intellectual, and political) and international collaborations are essential to protect these valued forest resources and the ecosystem goods and services they provide in a timely manner for our current generation and generations to come.

Acknowledgements

Funding for this work was provided by the Northeastern States Research Cooperative and the New York State Energy Research and Development Authority. Many thanks to Marc DeBlois (ministère du Développement durable, de l’environnement et des parcs) and Norman Willard (United States Environmental Protection Agency - New England), who graciously contributed their time and energy to the steering committee to help make this project happen, and to the many scientists in the United States and Canada who have contributed significant time, energy, enthusiasm, and effort to these syntheses.

Lindsey Rustad
USDA Forest Service

John Campbell
USDA Forest Service

Roger Cox
Canadian Forest Service

Jeffrey Dukes
Purdue University

T.G. Huntington
Bigelow Lab for Ocean Sciences

Alison Magill
University of New Hampshire

Andrew Richardson
University of New Hampshire

Jacqueline Mohan*The Ecosystem Center, Marine Biological Laboratory***Jennifer Pontius***USDA Forest Service***N.L. Rodenhouse***Wellesley College***M.R. Watson***New York State Energy Research and Development Authority***References**

- Campbell, J.L., Rustad, L.E., Boyer, E.W., Christopher, S.F., Driscoll, C.T., Fernandez, I.J., Groffman, P.M., Houle, D., Kiekbusch, J., Magill, A.H., Mitchell, M.J., and Ollinger, S.V. 2009. Consequences of climate change for biogeochemical cycling in forests of northeastern North America. *Can. J. For. Res.* **39**: 264–284. doi:10.1139/X08-104.
- Dukes, J.S., Pontius, J., Orwig, D., Garnas, J.R., Rodgers, V.L., Brazee, N., Cooke, B., Theoharides, K.A., Stange, E.E., Harrington, R., Ehrenfeld, J., Gurevitch, J., Lerdau, K., Stinson, J., Wick, R., and Ayres, M. 2009. Response of insect pests, pathogens, and invasive plant species to climate change in the forests of northeastern North America: What can we predict? *Can. J. For. Res.* **39**: 231–248. doi:10.1139/X08-171.
- Hayhoe, K., Wake, C.P., Huntington, T.G., Luo, L., Schwartz, M.D., Sheffield, J., Wood, E., Anderson, B., Bradbury, J., DeGaetano, A., Troy, T.J., and Wolfe, D. 2007. Past and future changes in climate and hydrological indicators in the US Northeast. *Clim. Dyn.* **28**: 381–407.
- Hayhoe, K., Wake, C.P., Anderson, B.T., Liang, X.-Z., Maurer, E.P., Zhu, J., Bradbury, J.A., DeGaetano, A.T., Stoner, A.M., and Wuebbles, D.J. 2008. Regional climate change projections for the Northeast USA. *Mitig. Adapt. Strategies Glob. Change*, **13**: 425–436. doi:10.1007/s11027-007-9133-2.
- Huntington, T.G., Richardson, A.D., McGuire, K.J., and Hayhoe, K. 2009. Climate and hydrological changes in the northeastern United States: recent trends and implications for forested and aquatic ecosystems. *Can. J. For. Res.* **39**: 199–212. doi:10.1139/X08-116.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: the physical science basis. *In* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Edited by* S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Iverson, L.R., Prasada, A.M., and Matthews, S.N. 2008. Modeling potential climate change impacts on the trees of the northeastern United States. *Mitig. Adapt. Strategies Glob. Change*, **13**: 487–516. doi:10.1007/s11027-007-9129-y.
- Keim, B.D., Wilson, A., Wake, C., and Huntington, T.G. 2003. Are there spurious temperature trends in the United States Climate Division Database? *Geophys. Res. Lett.* **30**: 1404. doi:10.1029/2002GL016295.
- Mohan, J.E., Cox, R.M., and Iverson, L.R. 2009. Composition and carbon dynamics of forests in northeastern North America in a future, warmer world. *Can. J. For. Res.* **39**: 213–230. doi:10.1139/X08-185.
- Ollinger, S.V., Goodale, C.L., Hayhoe, K., and Jenkins, P. 2008. Potential effects of climate change and rising CO₂ on ecosystem processes in northeastern U.S. forests. *Mitig. Adapt. Strategies Glob. Change*, **13**: 467–485. doi:10.1007/s11027-007-9128-z.
- Plummer, D.A., Caya, D., Frigon, A., Côté, H., Giguère, M., Paquin, D., Biner, S., Harvey, R., and de Elia, R. 2006. Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. *J. Clim.* **19**: 3112–3132. doi:10.1175/JCLI3769.1.
- Rodenhouse, N.L., Christenson, L.M., Parry, D., and Green, L.E. 2009. Climate change effects on native fauna of northeastern forests. *Can. J. For. Res.* **39**: 249–263. doi:10.1139/X08-160.
- Trombulak, S.C., and Wolfson, R. 2004. Twentieth-century climate change in New England and New York, USA. *Geophys. Res. Lett.* **31**: L19202. doi:10.1029/2004GL020574.

INTRODUCTION

NE Forests 2100 : Une synthèse de l'impact des changements climatiques sur les forêts du nord-est des États-Unis et de l'est du Canada

Les activités humaines telles que la combustion de carburants fossiles et la modification de l'utilisation des terres augmentent la concentration du dioxyde de carbone et celle des autres gaz à effet de serre (p. ex. l'oxyde nitreux, le méthane et les hydrocarbures halogénés) dans l'atmosphère. Les modèles climatiques indiquent que ces gaz qui retiennent la chaleur vont probablement causer une augmentation de la température moyenne de l'air à la surface de la Terre. Cette augmentation pourrait atteindre 1,1 à 6,4 °C vers la fin du 21^e siècle dépendamment d'un ensemble complexe de scénarios concernant les émissions futures, de l'aménagement du territoire et de divers mécanismes de rétroactions positives et négatives (GIEC 2007). L'augmentation de la température de l'air est déjà une réalité : des observations instrumentales indiquent que la température moyenne globale a augmenté de 0,75 °C au cours des 100 dernières années (GIEC 2007). Les changements qui ont été notés dans les précipitations (c.-à-d. la quantité, la fréquence, l'intensité et le type) ont suivi l'augmentation de la température de l'air et ils devraient se poursuivre dans le futur. Ces modifications du climat vont sans aucun doute avoir une myriade d'effets sur les écosystèmes terrestres d'autant plus que certains indices de changement sont déjà visibles. Il est difficile de prédire toutes les conséquences écologiques du changement climatique à cause des interactions complexes et des nombreuses rétroactions en cause. Jusqu'ici, beaucoup de travaux de recherche sur les réactions au changement climatique ont été réalisés dans le cadre d'expériences isolées et indépendantes. Peu d'importance a été accordée à la synthèse des connaissances. Il est nécessaire d'adopter une approche intégrée et de scruter les résultats de toutes les disciplines pour évaluer de façon exhaustive les réactions et réduire l'incertitude associée à la prédiction des changements futurs.

Cette méthode d'analyse interdisciplinaire est appliquée aux écosystèmes du nord-est de l'Amérique du Nord par un groupe de scientifiques américains et canadiens dans le cadre d'une initiative appelée *NE Forests 2100*. L'objectif de *NE Forests 2100* consiste à rassembler et synthétiser les résultats scientifiques des travaux de recherche sur le changement climatique en lien avec les écosystèmes forestiers de cette région. Cette collaboration internationale unique rassemble des scientifiques ayant différents domaines d'expertise pour constituer une image plus complète des effets potentiels du changement climatique à l'échelle régionale. Le travail effectué dans le cadre de cette initiative vise également à identifier les lacunes dans nos connaissances et à suggérer comment les études futures pourraient les combler. En plus d'être une source d'informations pour les chercheurs, une facette essentielle de *NE Forests 2100* consiste à transmettre les résultats scientifiques à l'ensemble de la communauté. Les résultats de cette analyse seront synthétisés et disséminés aux aménagistes du territoire, aux administrateurs gouvernementaux, aux organismes préoccupés par l'environnement et l'énergie ainsi qu'aux autres parties intéressées afin de leur fournir une information claire et concise sur laquelle asseoir leurs décisions stratégiques de gestion et d'orientation.

La région géographique couverte par l'initiative *NE Forests 2100* comprend sept États du nord-est des États-Unis (le Connecticut, le Maine, le Massachusetts, le New Hampshire, le Rhode Island, le Vermont et l'État de New York) et cinq provinces de l'est du Canada (le Nouveau-Brunswick, Terre-Neuve-et-Labrador, la Nouvelle-Écosse, l'Île-du-Prince-Édouard et le Québec). Les forêts situées dans cette région sont parmi les écosystèmes terrestres les plus intensément étudiés dans le monde, ce qui génère une abondance d'informations et de données sur lesquelles s'appuie cette synthèse. Régionalement, il y a un besoin urgent d'informations sur les effets du changement climatique parce que les décideurs sont en train d'élaborer des politiques et des programmes qui visent à réduire les émissions de gaz à effet de serre. En plus des plans d'action individuels face au changement climatique, des efforts coopératifs tels que la *Regional Greenhouse Gas Initiative* et le plan d'action sur le changement climatique de la Conférence des gouverneurs de la Nouvelle-Angleterre et des premiers ministres de l'est du Canada visent à contrôler les émissions de gaz à effet de serre indépendamment des frontières entre pays, provinces et États. Bien qu'une politique sur le changement climatique exige ultimement des solutions globales, ces efforts régionaux individuels marquent un progrès et témoignent d'une volonté d'agir.

Les données historiques montrent que le climat du nord-est de l'Amérique du Nord a déjà commencé à changer. Dans le nord-est des États-Unis, la température de l'air a augmenté d'environ 1 °C en moyenne au cours du dernier siècle comparativement à l'augmentation globale de 0,75 °C et l'augmentation a été plus prononcée en hiver qu'en été (Trombulak et Wolfson 2004; Hayhoe et al. 2007). Les précipitations ont aussi augmenté avec le temps bien que la tendance soit plus difficile à cerner que dans le cas de la température de l'air à cause de la plus forte variabilité interannuelle. Une augmentation significative des précipitations d'environ 10 mm à tous les 10 ans a néanmoins été observée dans le nord-est des États-Unis durant le 20^e siècle (Keim et al. 2003; Hayhoe et al. 2007). La nature et la distribution des précipitations changent également : plus de précipitations tombent sous forme de pluie et moins sous forme de neige; l'intensité et la fréquence de la pluie augmentent lors des gros orages et les périodes sèches entre les orages durent plus longtemps (résumé dans Huntington et al. 2009). Ces modifications des températures et des précipitations ont un impact sur une gamme d'autres variables météorologiques, hydrologiques et biophysiques et affectent les écosystèmes forestiers de diverses façons.

Jusqu'à récemment, on ne pouvait prédire les tendances du climat à l'échelle régionale, ce qui a par le fait même gêné les efforts pour simuler localement les réactions futures du milieu. Historiquement, la plupart des prédictions du climat ont été générées par les modèles couplés de circulation générale atmosphérique et océanique (MCCGAOs) qui produisent des données globales dont l'échelle spatiale (>100 km) ne convient pas à des applications locales et régionales. Les données générées par les MCCGAOs sont particulièrement inadéquates pour des régions comme le nord-est de l'Amérique du Nord où le climat varie à une échelle fine à cause de facteurs tels que l'hétérogénéité de la topographie, l'utilisation mixte des terres et les influences côtières. L'avènement de nouvelles techniques permettant de dériver des données dont la résolution spatiale est plus fine, à partir

des MCCGAOs, a considérablement réduit l'incertitude associée aux prédictions du climat régional. De nouvelles méthodes qui utilisent les réductions d'échelle statistique et dynamique ont récemment été appliquées dans le nord-est de l'Amérique du Nord (Plummer et al. 2006; Hayhoe et al. 2007, 2008). Il s'agit d'un apport précieux dans les modèles qui simulent les réactions des écosystèmes forestiers au changement climatique.

NE Forests 2100 utilise abondamment les prédictions du climat élaborées par Hayhoe et al. (2007, 2008) pour le nord-est des États-Unis au 21^e siècle. Ces prédictions sont basées sur les résultats des plus récents MCCGAOs disponibles via la base de données du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC 2007) et utilisent des procédures de réduction d'échelle statistique pour améliorer la résolution spatiale et temporelle. Les prédictions régionales indiquent que la température annuelle moyenne de l'air augmentera de 2,1 à 5,3 °C vers 2100 dépendamment des niveaux d'émission futurs et des différences parmi les MCCGAOs. Sur une base saisonnière, on prévoit que les températures hivernales augmenteront plus que les températures estivales jusqu'au cours des dernières décennies du 21^e siècle après quoi on prévoit des augmentations saisonnières similaires. Dans le cas des précipitations, les prédictions sont plus incertaines mais on prévoit une augmentation des précipitations annuelles et hivernales de respectivement 7–14 % et 12–30 % et peu de changements dans les précipitations estivales. Bien que ces résultats soient applicables seulement au nord-est des États-Unis, Plummer et al. (2006) a obtenu des résultats comparables pour l'est du Canada en procédant à une réduction d'échelle dynamique avec un modèle climatique régional. La confiance dans ces prédictions récentes du climat est plus élevée qu'elle l'était dans le cas des prédictions antérieures, établissant ainsi des bases plus solides pour étudier les effets du climat dans le nord-est de l'Amérique du Nord.

Les écosystèmes forestiers du nord-est de l'Amérique du Nord abritent une grande diversité de plantes et d'animaux qui pourraient être affectés par le changement climatique. Certaines espèces pourraient bénéficier du changement climatique et d'autres non. Tout changement dans l'aire de répartition actuelle des organismes modifiera la capacité de ces écosystèmes à fournir la vaste gamme de bénéfices dont dépend la région. Tant la forêt de feuillus nordiques que les forêts boréales et sub-boréales dominées par l'épinette et le sapin constituent les types dominants de couverture végétale dans le nord-est de l'Amérique du Nord. Ces écosystèmes supportent l'industrie forestière en fournissant des produits de base comme les pâtes et papiers, des biocarburants et des produits alimentaires. Ces forêts procurent également de nombreux services tels que l'eau et l'air purs, l'écroulement des crues, la biodiversité, la séquestration du carbone, les habitats fauniques, la récréation et le tourisme ainsi que des bénéfices plus intangibles d'ordre esthétique. S'il devait modifier considérablement la capacité de ces écosystèmes à fournir les biens et services dont dépend la région, le changement climatique pourrait avoir des impacts économiques et sociaux importants qui finiraient par affecter la qualité de vie de cette région.

Dans cette section spéciale de la *Revue canadienne de recherche forestière*, nous présentons cinq articles de synthèse basés sur la recherche actuelle. Ces articles complètent le travail d'Iverson et al. (2008) et d'Ollinger et al. (2008). Collectivement, ils montrent que les patrons climatiques à long terme de même que les variations des conditions météorologiques à court terme auront d'importantes conséquences pour les écosystèmes forestiers du nord-est de l'Amérique du Nord.

Le premier article (Huntington et al. 2009) passe en revue les changements climatiques et hydrologiques passés et à venir dans le nord-est de l'Amérique du Nord. L'article aborde aussi, brièvement, les conséquences possibles de ces changements pour les écosystèmes forestiers, incluant la composition de la forêt, les sécheresses, les feux, la dynamique de la neige et du gel, les tempêtes majeures et les changements dans la dynamique des cours d'eau. Le deuxième article (Mohan et al. 2009) traite des effets du climat sur la composition et la productivité des forêts en mettant l'accent sur le taux potentiel de changement et les vecteurs de changement interdépendants. Cet article examine aussi les facteurs qui ont contribué au dépérissement et au déclin des forêts de la région dans le passé. Le troisième article (Dukes et al. 2009) se concentre sur les ravageurs forestiers, les agents pathogènes et les espèces envahissantes collectivement appelés « espèces nuisibles ». Ces espèces ont la possibilité de rapidement et sérieusement affecter la nature et la composition des écosystèmes forestiers, particulièrement si leur action est combinée à celle d'événements tels une sécheresse, une tempête de vent ou de verglas, ou un feu. Le quatrième article (Rodenhouse et al. 2009) présente une synthèse de l'information au sujet des effets du climat sur la faune forestière en mettant l'emphase sur les mammifères, les amphibiens, les oiseaux et les insectes. Plusieurs espèces charismatiques font l'objet d'études de cas pour illustrer de quelle façon le climat affecte la faune et plusieurs résultats surprenants sont identifiés. Le dernier article (Campbell et al. 2009) analyse la cascade complexe d'événements provoquée par les changements engendrés par le climat dans le recyclage et les réserves de nutriments en forêt. Un modèle d'écosystème forestier sert à illustrer comment le changement climatique peut affecter les cycles biogéochimiques.

Bien que chaque article s'attaque à un aspect différent des effets du climat sur les écosystèmes forestiers nordiques, plusieurs thèmes communs émergent et font ressortir la complexité d'un changement potentiel et, de ce fait, la difficulté de prédire les réactions. Ces thèmes sont décrits en détail dans les différents articles et incluent :

- les effets directs versus les effets indirects
- les rétroactions positives versus les rétroactions négatives
- les facteurs de changement, multiples et interdépendants, le climat n'étant qu'un facteur parmi d'autres
- les effets qui ont des répercussions en cascade par l'intermédiaire des multiples composantes des écosystèmes forestiers
- l'échelle de temps variable, de quelques secondes à plusieurs millénaires
- les effets non linéaires et les réactions à seuil
- l'impact des effets différés ou engendrés par des événements passés sur les réactions
- l'hétérogénéité spatiale et temporelle des réactions dans le paysage complexe de la région
- les surprises et les résultats inattendus
- l'influence des facteurs humains tels que les changements dans la consommation d'énergie, l'utilisation des terres et l'aménagement forestier qui affectent l'ampleur et la direction des réactions

Tous ces facteurs créent inévitablement une certaine incertitude associée à la réaction des écosystèmes forestiers nordiques au changement climatique. Malgré cette incertitude, ce groupe de scientifiques est généralement d'accord qu'il existe assez de preuves que les effets anthropogènes sur le climat et ses conséquences écologiques ont changé au cours du

dernier siècle, qu'ils changent présentement et qu'ils vont continuer à changer dans un avenir prévisible. Malgré cela, il existe suffisamment de travaux de recherche et de connaissances pour que les décideurs, les aménagistes du territoire et les gens intéressés puissent contribuer à atténuer les changements actuels et futurs dans les écosystèmes forestiers et à s'adapter à ces changements. Des ressources financières, intellectuelles et politiques et des collaborations internationales sont essentielles pour protéger ces précieuses ressources forestières ainsi que les biens et services que fournissent les écosystèmes forestiers de façon opportune pour la génération actuelle et les générations futures.

Remerciements

Ce travail a été supporté financièrement par le Northeastern States Research Cooperation et le New York State Energy Research and Development Authority. Merci mille fois à Marc DeBlois (ministère du Développement durable, de l'environnement et des parcs) et à Norman Willard (United States Environmental Protection Agency - Nouvelle-Angleterre) qui ont gracieusement fourni temps et énergie au sein du comité directeur et contribué à concrétiser ce projet, et au nombreux scientifiques des États-Unis et du Canada qui ont avec enthousiasme consacré beaucoup de temps, d'énergie et d'efforts à la réalisation de ces synthèses.

Lindsey Rustad

USDA Forest Service

John Campbell

USDA Forest Service

Roger Cox

Canadian Forest Service

Jeffrey Dukes

Purdue University

T.G. Huntington

Bigelow Lab for Ocean Sciences

Alison Magill

University of New Hampshire

Andrew Richardson

University of New Hampshire

Jacqueline Mohan

The Ecosystem Center, Marine Biological Laboratory

Jennifer Pontius

USDA Forest Service

N.L. Rodenhouse

Wellesley College

M.R. Watson

New York State Energy Research and Development Authority

Bibliographie

- Campbell, J.L., Rustad, L.E., Boyer, E.W., Christopher, S.F., Driscoll, C.T., Fernandez, I.J., Groffman, P.M., Houle, D., Kieckbusch, J., Magill, A.H., Mitchell, M.J., et Ollinger, S.V. 2009. Consequences of climate change for biogeochemical cycling in forests of north-eastern North America. *Rev. can. rech. for.* **39** : 264–284. doi:10.1139/X08-104.
- Dukes, J.S., Pontius, J., Orwig, D., Garnas, J.R., Rodgers, V.L., Braze, N., Cooke, B., Theoharides, K.A., Stange, E.E., Harrington, R., Ehrenfeld, J., Gurevitch, J., Lerdau, K., Stinson, J., Wick, R., et Ayres, M. 2009. Response of insect pests, pathogens, and invasive plant species to climate change in the forests of northeastern North America: What can we predict? *Rev. can. rech. for.* **39** : 231–248. doi:10.1139/X08-171.
- GIEC. 2007. Climate Change 2007: the physical science basis. *Dans* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Édité par* S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.
- Hayhoe, K., Wake, C.P., Huntington, T.G., Luo, L., Schwartz, M.D., Sheffield, J., Wood, E., Anderson, B., Bradbury, J., DeGaetano, A., Troy, T.J., et Wolfe, D. 2007. Past and future changes in climate and hydrological indicators in the US Northeast. *Clim. Dyn.* **28** : 381–407. doi:10.1007/s00382-006-0187-8.
- Hayhoe, K., Wake, C.P., Anderson, B.T., Liang, X.-Z., Maurer, E.P., Zhu, J., Bradbury, J.A., DeGaetano, A.T., Stoner, A.M., et Wuebbles, D.J. 2008. Regional climate change projections for the Northeast USA. *Mitig. Adapt. Strategies Glob. Change*, **13** : 425–436. doi:10.1007/s11027-007-9133-2.
- Huntington, T.G., Richardson, A.D., McGuire, K.J., et Hayhoe, K. 2009. Climate and hydrological changes in the northeastern United States: recent trends and implications for forested and aquatic ecosystems. *Rev. can. rech. for.* **39** : 199–212. doi:10.1139/X08-116.
- Iverson, L.R., Prasada, A.M., et Matthews, S.N. 2008. Modeling potential climate change impacts on the trees of the northeastern United States. *Mitig. Adapt. Strategies Glob. Change*, **13**: 487–516. doi: 10.1007/s11027-007-9129-y.
- Keim, B.D., Wilson, A., Wake, C., et Huntington, T.G. 2003. Are there spurious temperature trends in the United States Climate Division Database? *Geophys. Res. Lett.* **30** : 1404. doi:10.1029/2002GL016295.
- Mohan, J.E., Cox, R.M., et Iverson, L.R. 2009. Composition and carbon dynamics of forests in northeastern North America in a future, warmer world. *Rev. can. rech. for.* **39** : 213–230. doi:10.1139/X08-185.
- Ollinger, S.V., Goodale, C.L., Hayhoe, K., et Jenkins, P. 2008. Potential effects of climate change and rising CO₂ on ecosystem processes in northeastern U.S. forests. *Mitig. Adapt. Strategies Glob. Change*, **13** : 467–485. doi:10.1007/s11027-007-9128-z.
- Plummer, D.A., Caya, D., Frigon, A., Côté, H., Giguère, M., Paquin, D., Biner, S., Harvey, R., et de Elia, R. 2006. Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. *J. Clim.* **19** : 3112–3132. doi:10.1175/JCLI3769.1.
- Rodenhouse, N.L., Christenson, L.M., Parry, D., et Green, L.E. 2009. Climate change effects on native fauna of northeastern forests. *Rev. can. rech. for.* **39** : 249–263. doi:10.1139/X08-160.
- Trombulak, S.C., et Wolfson, R. 2004. Twentieth-century climate change in New England and New York, USA. *Geophys. Res. Lett.* **31** : L19202. doi:10.1029/2004GL020574.