

**Changements climatiques :
impacts sur les forêts québécoises
- revue de littérature -**

Rapport présenté par :



Éric Forget, Ing.f., M.Sc.

Ronnie Drever, R.P.Bio., M.R.M.

François Lorenzetti, Ph.D.

À



Mars 2003

Remerciements

Nous tenons en premier lieu à remercier Alain Bourque, du consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques Ouranos, qui a su partager ses connaissances de la météorologie et pour sa disponibilité tout au long du projet. Nos remerciements s'adressent également aux chercheurs de l'IQAFF qui ont révisé différentes sections de ce document : Pascale Sabbagh, Frédérik Doyon, Philippe Nolet et Yves Jardon. Nous tenons à témoigner notre reconnaissance à Alain Leduc et Héloïse Le Goff du GREFi qui ont pris le temps de commenter la version préliminaire de ce rapport.

Ce projet a été réalisé grâce au financement du consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques Ouranos.

Résumé

Éric Forget, ing.f., M.Sc. Institut Québécois d'Aménagement de la Forêt Feuillue

Ronnie Drever, R.P.Bio., M.R.M. Université du Québec à Montréal

François Lorenzetti, Ph.D. Institut Québécois d'Aménagement de la Forêt Feuillue

La concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère de la terre a augmenté de manière importante au cours des 150 dernières années, entraînant une hausse d'environ 0,5 °C de la température globale. Au Québec, le réchauffement pourrait atteindre 5°C en hiver d'ici 2100, et serait accompagné d'une augmentation des précipitations de 10 à 25% par rapport aux conditions actuelles. L'impact des changements climatiques sur les différents processus physiologiques des arbres sera variable, et l'effet combiné d'une augmentation de la température, de la concentration de CO₂ des précipitations et du prolongement de la saison de croissance sur la croissance est difficilement prévisible. Le risque d'une réduction catastrophique de croissance ou de productivité semble négligeable pour la plupart des régions; cependant, une hausse de la fréquence des événements de gel-dégel pourrait entraîner une augmentation du dépérissement, et d'autres facteurs comme les polluants atmosphériques pourraient affecter la productivité globale des écosystèmes. Dans un environnement de deux fois les concentrations actuelles de CO₂, l'abondance relative et la distribution des essences forestières pourraient être passablement modifiées; les espèces de lumière à croissance rapide comme le peuplier faux-tremble ou l'érable rouge, qui possèdent une bonne capacité de dispersion des semences et sont capables de croître sur des conditions de sols variées, pourraient bénéficier des changements climatiques et étendre leurs aires de distribution. De manière générale, les sites avec des conditions climatiques optimales de croissance pour une essence donnée se situeront plus au nord et plus hauts en altitude. Le déplacement des essences qui suivra pourrait compromettre l'intégrité écologique des

communautés. La géomorphologie de la région, les espèces introduites, la fragmentation de la forêt et les interactions avec les perturbations naturelles et anthropiques sont reconnus pour affecter la migration des espèces. Contrairement à la majorité du continent nord-américain, les études récentes réalisées pour le Québec prévoient de manière générale une diminution de la fréquence des incendies de forêt en raison de la hausse anticipée des précipitations, et cela, en dépit d'une augmentation prévue de la longueur de la saison des incendies de forêt. Les insectes défoliateurs seront affectés directement par les changements de température, de précipitations et des concentrations de CO₂, et indirectement par l'effet de ces facteurs sur les peuplements forestiers, les pathogènes et les parasites. Au Québec, une augmentation de l'intensité des épidémies (notamment de la tordeuse des bourgeons de l'épinette) et de la diversité des insectes est probable (due à une expansion vers le nord), laquelle pourrait éventuellement affecter la structure et la composition de la forêt ainsi que la biodiversité. Tout comme pour les insectes, les changements climatiques affecteront directement et indirectement la prolifération des pathogènes forestiers et leur succès de sporulation et d'établissement. La résistance des arbres à certains pathogènes est un caractère fortement héritable, donc moins susceptible aux effets de l'environnement. Le manque d'information nous empêche de conclure à un effet global positif ou négatif des changements climatiques sur les pathogènes. Les champignons présents dans le sol forestier pourraient jouer un rôle déterminant dans la réponse des écosystèmes aux changements climatiques. Les événements climatiques extrêmes représentent également une menace puisqu'une hausse de la fréquence et de l'intensité des tempêtes de vents violents et des tornades est prévue. Aussi, il est possible que la fréquence des tempêtes de verglas augmente avec un rapprochement des températures hivernales du point de congélation. Des connaissances additionnelles sont requises afin de permettre des évaluations plus précises de l'effet des changements climatiques à long terme sur les forêts québécoises et de permettre de développer des méthodes d'atténuation. Les résultats de cette revue de littérature sont basés sur les meilleurs scénarios climatiques disponibles à ce jour. Leur mise à jour par les modèles régionaux de circulation pourrait en changer les conclusions, notamment celles relatives à la fréquence des incendies de forêt.

Abstract

Éric Forget, ing.f., M.Sc. Institut Québécois d'Aménagement de la Forêt Feuillue

Ronnie Drever, R.P.Bio., M.R.M. Université du Québec à Montréal

François Lorenzetti, Ph.D. Institut Québécois d'Aménagement de la Forêt Feuillue

The concentration of greenhouse gases in the Earth's atmosphere has increased considerably during the last 150 years, leading to a rise of about 0.5°C in the global surface temperature. In Quebec, the warming could reach 5°C in the winter by 2100 and be accompanied by increases in precipitation of 10 to 25%. The impacts of this climate change on the different physiological processes of trees will vary, and the combined effects of increased temperature, increased concentrations of CO₂ and other greenhouse gases, and an elongation of growing season are difficult to predict. The risk of a catastrophic reduction in tree growth and productivity seems negligible for most of the regions of Quebec; however, an increase in the frequency of freeze-thaw events could lead to an augmentation in forest dieback and other factors such as atmospheric pollutants could affect the productivity of ecosystems in general. Under doubled CO₂ concentrations relative to the present, the relative abundance and distribution of tree species could be substantially modified. Fast-growing, shade intolerant species like trembling aspen or red maple, that also have a good capacity for seed dispersion and are capable of growing in diverse soil conditions, could benefit from climate change and expand their range. In general, sites with the climatically optimal conditions for growth of a given species will shift to the north and to higher elevations. Climatically-induced species shifts could compromise the ecological integrity of plant communities. Geomorphology, introduced species, forest fragmentation, and interactions with natural and human disturbances are recognized as important factors influencing the future migration of tree species. Contrary to the majority of the North American continent,

recent studies predict a general decrease in the frequency of forest fires in northern Quebec due to the anticipated increase in precipitation and despite an anticipated increase in the length of the fire season. Defoliating insects will be affected directly by changes in temperature, precipitation and CO₂ concentrations as well as indirectly by the effects of these factors on forest stands, pathogens, and parasites. In Quebec, an increase in the intensity of epidemics (notably the spruce budworm) and in the diversity of insects is likely and could eventually affect forest structure and composition at a broad scale. As for insects, climate change will both directly and indirectly affect the proliferation of forest pathogens and the success of their spore dispersal and establishment. The resistance of trees to certain pathogens is a strongly inherited trait and therefore less susceptible to environmental effects. A paucity of information precludes any general conclusions about the positive or negative effects of climate change on forest pathogens. Soil fungi could play a key role in determining the response of ecosystems to climate change. Extreme climatic events represent a threat to forests as an increase in the frequency and intensity of violent wind storms is predicted. Also, it is possible that the frequency of ice storms will increase with a convergence of winter temperatures to the freezing point. Much more research is needed to allow precise evaluations of the long-term effects of climate change on the forests of Quebec as well as to allow the development of strategies for mitigation and adaptation. The conclusions of this review are based on the best climatic scenarios presently available. Updating these scenarios with regional circulation simulations could change these conclusions, in particular those related to the frequency of forest fires.

Changements climatiques : effet sur les forêts Québécoises

Remerciements.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract	v
Liste des tableaux.....	viii
Introduction.....	1
Scénarios climatiques.....	3
Physiologie et croissance	4
Dioxyde de carbone (CO ₂).....	5
Température	10
Précipitations	13
Phénologie.....	16
Extrêmes de température.....	18
Migration des espèces et déplacement des écosystèmes.....	23
Changements de composition prévus pour le Québec	32
Facteurs affectant le déplacement des espèces et des écosystèmes	37
Santé des forêts	47
Insectes ravageurs	47
Effets directs	48
Relations trophiques.....	53
Effets indirects	55
Impact global des insectes sur forêt	61
Reconstruction des paléontomofaunes.....	63
Changements récents et en cours, migrations et dispersions	63
Champignons et autres pathogènes.....	67
Perturbations naturelles.....	73
Incendies forestiers	73
Fréquence et occurrence des incendies de forêt.....	75
Types et intensité des incendies de forêt.....	80
Saison des incendies de forêt	81
Foudre	81
Effets indirects	83
Chablis	95
Verglas	98
Impacts sur la forêt.....	102
Comment les changements climatiques affecteront les tempêtes de verglas?	110
Conclusion	113
Bibliographie.....	114

Liste des tableaux

Tableau 1 Scénarios optimiste, moyen et pessimiste de la température (°C) et des précipitations (%) pour le Sud et le Nord du Québec pour la saison estivale et hivernale en 2080..... 4

Tableau 2 Effet d’une augmentation de la concentration de CO₂, de la température et de la sévérité et la fréquence des sécheresses sur les différents processus physiologiques (Extrait de Colombo 1998a) 22

Tableau 3 – Auteur, région étudié, outils et constats des principales études réalisées sur les incendies de forêt relatives au Québec 85

Introduction

D'après le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat (GIEEC), il ne fait maintenant plus de doute que l'activité humaine a contribué, par des émissions de gaz à effet de serre, à une augmentation des températures globales à la surface de la terre. Alors que l'impact de ces changements climatiques se fait déjà sentir sous différentes formes et avec différentes intensités dans les diverses régions du monde, les émissions de carbone d'origine anthropique ne cessent d'augmenter. Depuis 150 ans, la concentration de carbone est passée de 280 à 370 parties par million (ppm) et la température à la surface de la terre a augmenté d'environ 0,5 °C. Au Québec comme dans le reste du Canada, le réchauffement devrait être plus important au nord qu'au sud et pourrait atteindre 3,5 °C d'ici 2100.

Ces changements climatiques pourraient avoir de graves conséquences sur les écosystèmes forestiers québécois. À première vue, le réchauffement du climat pourrait paraître bénéfique dans une région où la saison de croissance est relativement courte; cependant, des événements climatiques extrêmes ou un changement brusque et de trop grande amplitude des températures et/ou des précipitations pourraient compromettre l'équilibre des écosystèmes forestiers. Parmi les dangers qui guettent la forêt des prochaines décennies, on retrouve une possible augmentation de la fréquence des incendies de forêt et des épidémies d'insectes, des effets négatifs sur la croissance et des déplacements possibles d'écosystèmes, en plus d'événements catastrophiques extrêmes comme les tornades et les inondations. L'enjeu est important dans une région comme le Québec, où la forêt joue des rôles multiples, tant du point de vue de la valeur économique, social que biologique. Il suffit de penser aux 80 000 emplois en région qui dépendent de la disponibilité de la matière ligneuse (AMBSQ 2003), ou encore aux écosystèmes dont l'intégrité est menacée et que même les mesures de protection les plus radicales ne suffiront pas à protéger. Les changements climatiques pourraient aussi engendrer des coûts supplémentaires en matière de protection des forêts au cours des prochaines années.

Afin de réduire l'impact négatif qu'auront les changements climatiques sur les forêts québécoises, il importe d'anticiper leurs effets sur les différentes fonctions des forêts. Or l'état des connaissances actuelles est insuffisant pour atteindre cet objectif. La présente revue de littérature vise donc à 1) faire le point sur les connaissances actuelles ayant trait aux impacts possibles des changements climatiques sur les différentes fonctions des écosystèmes forestiers québécois et 2) à servir d'outil pour aider la priorisation des futurs projets de recherche.

Scénarios climatiques

Les scénarios de réchauffement climatique global du GIEC (Hulme *et al.*, 1999) prévoient une hausse de 0,1 à 0,4°C de la température moyenne par décennie, pour une augmentation cumulée en 2080 de l'ordre de 1,2° à 3,9° C. Les températures pourraient augmenter d'un 40% additionnel sous les latitudes les plus nordiques. Un réchauffement de 0,8°C a déjà été enregistré depuis la fin du 19^{ème} siècle.

Pour le Québec, le scénario moyen prévoit une augmentation des températures en été de 2 à 3°C dans le sud (au sud du 50°N) avec une hausse des précipitations de 3% à 5% Hulme et Shread 1999. Dans le secteur nord (au nord du 50°N), l'augmentation de température devrait être sensiblement la même que pour le sud mais jumelée à une hausse des précipitations plus marquée (5% à 10%). En hiver, les températures seraient plus élevées de 3 à 4 °C dans le secteur sud avec une augmentation importante des précipitations de 10 à 20%. Dans le nord, les augmentations prévues sont de 3 à 5°C pour la température et de 10 à 25% pour les précipitations. On prévoit également une augmentation des variations journalières de température. Ces valeurs sont évidemment le résultat de moyennes pour de grands territoires et cette limitation devrait être considérée lors de l'utilisation de ces données. Avec de tels scénarios, l'évaporation sur le sud du Québec dépasserait amplement, sur une base annuelle, l'excès de précipitations anticipées. Pour le nord, c'est plutôt un équilibre, voir même une inversion de la situation qui est anticipée avec ces mêmes scénarios.

Tableau 1- Scénarios optimiste, moyen et pessimiste de la température et des précipitations pour le Sud et le Nord du Québec pour la saison estivale et hivernale en 2080.

Saison	Sud du Québec			Nord du Québec		
	optimiste	moyen	pessimiste	optimiste	moyen	pessimiste
Été (juin à août)	+1,5°C 0%	+2 à +3°C 0 à +5%	+4,5 à +5°C 0 à +10%	+1 à +1,5°C 0 à +5%	+2 à +3°C +5 à +10%	+4 à +4,5°C +10 à +20%
Hiver (décembre à février)	+2°C +10%	+3 à +4°C +10 à +20%	+6 à +7°C +25 à +35%	+2 à +3°C +5 à +15%	+4 à +5°C +10 à +25%	+7 à +9°C +20 à +40%

Physiologie et croissance

La physiologie et la productivité de la végétation forestière sont directement affectées par la température, la concentration de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'air, la disponibilité des nutriments et le régime hydrique, et indirectement par l'effet de l'interaction interspécifique (Reed *et al.*, 1992; Graumlich 1993). Les changements climatiques prévus au cours des prochaines décennies auront donc nécessairement des répercussions sur la croissance des peuplements forestiers et incidemment, sur le rendement des forêts (Reed *et al.*, 1992; Graumlich 1993; Rehfeldt *et al.*, 1999; Papadopol 2000).

Dioxyde de carbone (CO_2)

L'effet d'une augmentation de la concentration de CO_2 sur les différents processus physiologiques est très variable (Colombo 1998a). Alors que l'efficacité d'utilisation de la lumière, de l'eau et des nutriments ainsi que la tolérance à la sécheresse ont tendance à s'améliorer avec une augmentation de la concentration de CO_2 , l'effet sur l'efficacité de la photorespiration serait inverse (Tableau 2). Aussi, un gain en CO_2 a un effet positif sur l'activité photosynthétique puisque le CO_2 est généralement un facteur limitant de la croissance des espèces arborescentes au Québec (Mott 1990; Kirschbaum 2000). L'augmentation de l'activité photosynthétique est de l'ordre de 25-75 % dans un environnement de deux fois la concentration actuelle de CO_2 ($2 \times \text{CO}_2$), et pourrait déjà avoir été affectée depuis le début de l'ère pré-industrielle (Battaglia et Beadle 1996; Kimball 1983 dans Kirschbaum 2000). L'effet du CO_2 sur la croissance est plus fortement limité par la disponibilité des nutriments que par celle de l'eau (Drake *et al.*, 1997; Kirschbaum 1999b) et pourrait ne pas être soutenu sur une longue période (Mott 1990; mais voir Groninger *et al.*, 1999). Selon les auteurs, les effets escomptés d'une augmentation de CO_2 varient de nul à très positif selon l'espèce et le stade de développement. Pour le peuplier, il semble que la réponse à une augmentation de CO_2 sur la croissance soit positive, deux études réalisées sur cette essence montrant des gains de masse sèche et un accroissement du volume variant entre 20 et 30 % (Dickson *et al.*, 1998; Isebrands *et al.*, 2001). Dans une revue de littérature sur les peupliers, Gielen et

Ceulemans 2001 concluent qu'en dépit de la variation entre les différentes espèces de peuplier et de la possible diminution du phénomène d'enrichissement au fil des ans, l'augmentation de la concentration de CO₂ se traduirait par un accroissement de la production de biomasse allant de 22 à 90%. Tissue *et al.*, (1996) concluent également à un effet positif pour le pin Taeda. Par contre, d'autres études réalisées sur des semis de peuplier et d'érable (Volin *et al.*, 2002) et sur le sapin Douglas (Olszyk *et al.*, 1998b) concluent en une réponse très faible ou nulle (voir aussi Caspersen *et al.*, 2000).

Selon Korner (1993), de manière générale, une augmentation de la concentration de CO₂ favoriserait, en ordre décroissant : les espèces herbacées annuelles, les herbacées vivaces (épilobe, framboisier et herbes), les espèces d'arbres feuillues et finalement les conifères; les espèces de fin de succession (e.g. érable, bouleau jaune, épinette blanche et pin blanc) seraient moins favorisées que les essences plus intolérantes (e.g. peupliers, chênes, épinette noire); les arbres plus jeunes seront favorisés vis-à-vis des arbres plus vieux (voir aussi Papadopol 2000) et les arbres sur des sites chauds et sans déficience nutritive seront favorisés.

Les effets positifs de l'augmentation de CO₂ pourraient être mitigés par la présence de polluants (O₃, SO₂, HNO₃) (McLaughlin et Percy 1999; Isebrands *et al.*, 2001). Dans un article récent, Percy *et al.*, 2002 démontrent que les concentrations actuelles de O₃ présentes dans l'atmosphère sont dommageables et que la productivité du peuplier faux-tremble en est affectée. Ils insistent pour que l'O₃ soit considéré dans les évaluations prochaines de l'impact des changements climatiques sur les écosystèmes.

Température

Une augmentation de la température affecte pratiquement l'ensemble des processus physiologiques. La photorespiration, la respiration nocturne, la conductivité stomatale, la photosynthèse et le taux de croissance augmentent généralement avec une hausse de la température (Tableau 2). Cependant, le taux de photosynthèse plafonne à des températures intermédiaires et avant de diminuer à de plus hautes températures

(Kirschbaum 2000). Une hausse de la température ne devrait pas changer l'efficacité d'utilisation de la lumière ou des nutriments, mais pourrait avoir un effet négatif sur l'utilisation de l'eau par les arbres. L'effet général d'une augmentation de la température sur la photosynthèse est donc positif, surtout lorsque combinée à une augmentation de la disponibilité en eau.

Il est clair que la réaction à une augmentation de la température dépend des espèces (Reed *et al.*, 1992; Graumlich 1993; Kirschbaum 2000). Plusieurs études ont démontré qu'une augmentation de la température avait un effet positif sur la croissance (érable à sucre : Courchesne *et al.*, 2001; pin gris : Brooks *et al.*, 1998) et la productivité de plusieurs essences (Churkina et Running 2000). Par contre, dans le cas du sapin Douglas, l'augmentation de la température a mené à une réduction de la longueur totale de la pousse terminale, bien que des taux accrus de croissance aient été obtenus en début de saison de croissance (Olszyk *et al.*, 1998a). Hofgaard *et al.*, (1999) mentionnent que la croissance radiale de l'épinette noire et du pin gris est négativement corrélée avec la température au-dessus de la moyenne à la fin de la saison de croissance de l'année précédente, mais positivement corrélée avec un début de saison de croissance hâtif. Brooks *et al.*, (1998) ont aussi démontré que des conditions plus froides et plus humides favorisent la croissance de l'épinette noire. Pour l'érable à sucre, il a été démontré que la croissance est plus fortement associée à la température qu'aux précipitations, et que les conditions climatiques de la saison précédente affectent la croissance de l'année en cours (Lane *et al.*, 1993).

La productivité des écosystèmes peut aussi être affectée indirectement par une augmentation de la température. Par exemple, le taux de décomposition de la matière organique augmente avec une hausse de la température, rendant les nutriments plus rapidement disponibles pour les plantes (Kirschbaum 2000). Aussi, une diminution de l'épaisseur de la neige au sol en hiver pourrait affecter le risque de gel racinaire et le déhaussement des semis par le gel (Bergsten *et al.*, 2001).

Précipitations

Des conditions hydriques plus sèches auraient des répercussions variées et opposées sur les différents processus physiologiques. Une sécheresse entraîne généralement une baisse de l'activité photosynthétique, de la conductivité stomatale et de l'efficacité d'utilisation de lumière, alors que la photorespiration, la respiration de nuit, l'efficacité d'utilisation de l'eau et la susceptibilité aux insectes et maladies devraient augmenter dans de telles conditions (Tableau 2).

Plusieurs facteurs affecteront la réponse des peuplements forestiers à une modification du régime hydrique. On note en premier lieu l'âge et la structure des peuplements forestiers. En effet, puisque les arbres matures ont des systèmes racinaires bien installés, ceux-ci seraient moins sensibles aux variations hydriques que les peuplements plus jeunes, du moins à court terme. De la même manière, les arbres en sous-couvert seraient plus susceptibles aux sécheresses, ces arbres ayant moins de réserves de carbone et leurs systèmes racinaires étant moins bien développés (Flanagan *et al.*, 1992 dans Hanson et Weltzin 2000). Des réponses très variables entre les espèces ont aussi été observées (Graumlich 1993). Cette variation serait explicable en partie par la structure et le fonctionnement des différentes essences (i.e. pores diffus, zone poreuse). Par exemple les espèces à zone poreuse comme le chêne, qui possèdent de gros vaisseaux dans le bois initial, seraient en meilleure position pour profiter des conditions plus humides du début de la saison de croissance (Graumlich 1993; Reed *et al.*, 1992) ce qui leur permettrait de soutenir des conditions plus sèches au cours de l'été (Williams 1995). Une modification des patrons d'allocation des ressources entre le système racinaire et la cime est une autre stratégie permettant de mitiger l'effet des sécheresses. Ainsi, certaines essences investiront beaucoup d'énergie à développer des systèmes racinaires importants afin de profiter de l'eau disponible en profondeur, alors que d'autres essences miseront sur une stratégie inverse (Hanson et Weltzin 2000).

Puisque la disponibilité hydrique est un facteur limitant la productivité de certains écosystèmes en Amérique du Nord, la productivité de plusieurs essences commerciales

pourrait être affectée par celle-ci (Churkina et Running 1998). Une étude dans l'ouest du Québec a démontré que des précipitations plus importantes que la moyenne en juin de l'année courante et de l'année précédente auraient un effet positif sur la croissance radiale de l'épinette noire (Hofgaard *et al.*, 1999). L'effet d'une augmentation des précipitations au Québec pourrait donc être bénéfique en compensant pour la hausse de l'évaporation causée par l'augmentation de la température (cas possible pour le nord du Québec). Par contre, dans le cas d'une hausse de l'évapotranspiration causée par une augmentation des températures sans changement au régime de précipitations, le stress hydrique subi par les arbres pourrait être accentué considérablement (cas possible pour le sud du Québec).

Phénologie

Les changements climatiques pourraient avoir un effet sur la croissance des arbres en affectant la longueur de la saison de croissance. En effet, dans les zones tempérées, le contrôle des différentes phases de croissance printanière (débourrement, feuillaison) est principalement une réponse à l'accumulation de degrés jour au-dessus d'un seuil (degrés jour de croissance) (Beaubien et Freeland 2000). D'un réchauffement des températures en hiver résulterait donc un débourrement hâtif au printemps (épinette blanche au Québec : Colombo 1998b; peuplier faux-tremble en Alberta : Beaubien et Freeland 2000), au prolongement de la saison de croissance (Chuine *et al.*, 2000), et donc à une augmentation de la croissance (épinette blanche et pin gris au Québec : Hofgaard *et al.*, 1999; Myneni *et al.*, 1997). Des observations réalisées à partir de données satellites suggèrent qu'une augmentation de l'activité photosynthétique de la végétation entre 1981 et 1991 serait liée au prolongement de la saison de croissance, et que le Québec serait dans la zone la plus affectée par ce changement (Myneni *et al.*, 1997). Bien que l'augmentation du CO₂ sans changement de la température provoquerait un retard de débourrement de l'épinette de Sitka, un réchauffement combiné avec une augmentation du CO₂ hâte le débourrement, mais l'effet serait moindre que dans le cas du réchauffement seul (McAlpine 1998).

Extrêmes de température

Selon plusieurs auteurs, les événements de température extrêmes seront à l'origine de problèmes plus importants que ceux liés à un léger changement de la température moyenne (Flannigan 1998; Cox et Malcom 1997). Par exemple, des épisodes de gel-dégel en hiver, de gels hâtifs à l'automne, de gels tardifs au printemps, de canicule ou de périodes prolongées sans pluie pourraient causer des dommages aux écosystèmes. Les dégâts dépendront non seulement de la température extrême, mais aussi de la durée de l'exposition, des caractéristiques des fluctuations thermiques (augmentation ou diminution, vitesse de variation et écarts entre maxima et minima de température) et de l'état physiologique de la plante au moment où se produisent ces phénomènes (Quamme 1987 dans Richer *et al.*, 2001).

Les modèles climatiques anticipent un réchauffement plus important de la température pendant les mois d'hiver que pendant les mois d'été et une augmentation des variations de température. Par conséquent, les espèces sensibles au dégel, comme le bouleau jaune (Zhu *et al.*, 2002) et le bouleau blanc (Cox et Malcom 1997), pourraient montrer des signes de dépérissement. Le dépérissement est causé par une perte de conductivité irréversible au niveau du xylème et par des dommages au système racinaire (Cox et Malcom 1997). Auclair *et al.*, (1996) ont démontré qu'un événement de gel-dégel joue le rôle de facteur déclenchant un dépérissement. Ces auteurs ont démontré que, suite à des événements de gel-dégel, une relation existe entre les périodes de sécheresse ou de chaleur intense et le dépérissement. Aussi, plus la période de dégel perdure, moins les températures ont besoin d'être basses pour endommager les racines ou les branches Zhu *et al.*, 2002.

Dans le contexte de réchauffement global et d'augmentation probable des variations de température, Auclair *et al.*, (1996) prédisent une résurgence d'épisodes sévères de dépérissement pour la deuxième moitié du 21^{ème} siècle. Dans une perspective de réchauffement de 5 °C, Colombo (1998b) prédit une diminution du risque de gel, avec des variations du risque de gel en fonction des interactions survenant entre la provenance

des individus et le climat local.

Il est difficile d'évaluer avec précision l'effet global à long terme qu'aura l'ensemble des changements climatiques sur la productivité des écosystèmes car les augmentations prédites de CO₂, de température et de sécheresse affectent dans des sens différents les processus physiologiques à la base de la croissance des végétaux. Ceci se reflète dans le Tableau 2 qui résume l'information présentée dans la présente section.

- 1. Les impacts des changements climatiques sur la croissance de la forêt seront variables et dépendront de la région, de la composition des peuplements et des conditions de site (Luckman et Kavanagh 2000) ;**
- 2. Le risque de réductions catastrophiques de croissance ou de productivité semble négligeable pour la plupart des régions (Kirschbaum 2000; Hanson et Weltzin 2000);**
- 3. Les peuplements d'une espèce situés sur des sites où la température est basse par rapport aux secteurs les plus chauds de l'aire de distribution de cette espèce seront probablement favorisés par une hausse de température (Kirschbaum 2000);**
- 4. Les facteurs affectant la croissance étant intrinsèquement liés entre eux, il est important d'étudier le phénomène de manière globale et dans son environnement naturel.**

Tableau 2- Effet d'une augmentation de la concentration de CO₂, de la température, et de la sévérité et la fréquence des sécheresses sur les différents processus physiologiques (Extrait de Colombo 1998a)

Processus physiologiques	Augmentation de la concentration de CO ₂	Augmentation de la température	Augmentation de la sévérité et de la fréquence des sécheresses
Photosynthèse	hausse sujette à des rétroactions liées aux ressources disponibles	hausse sujette à des rétroactions liées aux ressources disponibles	baisse pendant et suivant les sécheresses
Photorespiration	baisse (généralement)	hausse	hausse
Respiration nocturne	baisse légère	hausse	hausse
Conductivité stomatale	baisse	hausse jusqu'à des températures de 30-35 °C	baisse
Efficience d'utilisation de la lumière	hausse	aucun changement	baisse
Efficience d'utilisation de l'eau	hausse	baisse (pour une pression de vapeur constante)	hausse
Efficience d'utilisation nutritionnelle	hausse	aucun effet	pourrait augmenter
Phénologie	raccourcissement de la saison de croissance dû à : un débourrement plus tardif un embourgeoisement plus hâtif	débourrement plus tôt au printemps endurcissement du bourgeon plus tardif	arrêt plus tôt de l'élongation
Allocation du carbone / structure de l'arbre	augmentation des taux de croissance réduction de la densité stomatale hausse de la croissance racinaire	hausse des taux de croissance débourrement et fleuraison plus hâtifs	hausse de la production de fleurs et de semences
Susceptibilité au stress	hausse de la tolérance à la sécheresse due à la fermeture des stomates	hausse des dommages potentiels par le gel hivernal et printanier	hausse de la susceptibilité aux autres stress, aux insectes et maladies

Migration des espèces et déplacement des écosystèmes

L'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère pourrait engendrer des changements dramatiques dans l'abondance et la composition des peuplements forestiers (Solomon 1986; Melillo 1999; Iverson et Prasad 2002). En effet, les changements de température, de précipitations et de la longueur des saisons de croissance peuvent influencer la distribution des espèces en plus d'affecter les processus physiologiques et écologiques (Bazzaz 1996). De manière générale, on s'attend à ce que l'habitat adéquat pour une espèce se déplace vers le nord et en plus haute élévation (Rizzo et Wilken 1992), comme ce fut le cas pour la période de réchauffement de l'Holocène (Delcourt et Delcourt 1988; Liu 1990) et au cours du dernier siècle (Luckman et Kavanagh 2000). Des études paléoécologiques suggèrent que les espèces migreront individuellement plutôt que par communautés végétales, et que le taux de migration sera fonction de l'espèce (Whitney 1986; Peters 1990). Il est difficile de prédire l'effet de la vitesse de réchauffement sur la capacité des espèces à migrer puisque la vitesse du réchauffement est sans précédent - 10 à 40 fois plus rapide que la moyenne depuis le dernier maximum glaciaire (Rizzo et Wilken 1992); la capacité de migration de plusieurs espèces pourrait être insuffisante (Davis 1989; Kirilenko *et al.*, 2000). Les populations isolées, hautement spécialisées, à la limite de leur aire de distribution ou incapables de disperser leurs semences sur d'assez longue distance pourraient disparaître, du moins localement (Peters et Lovejoy 1992; Rizzo et Wilken 1992; Parker *et al.*, 2000; Kirschbaum 2000). Les espèces à croissance rapide, avec des semences légères capables de voyager sur de grandes distances et adaptées aux perturbations comme le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) et l'érable rouge (*Acer rubrum*) pourraient avoir une meilleure résilience aux changements climatiques et conséquemment être favorisées (Thompson *et al.*, 1998; Intergovernmental Panel on Climate Change 2001).

Plusieurs types d'études ont été employés pour expliquer et prédire la distribution des espèces et des écosystèmes sous l'influence des changements climatiques : 1) études basées sur les processus, 2) études paléoécologiques et 3) les études statistiques (Iverson

et Prasad 2001). Chaque type a des avantages et des inconvénients; mais considérant la complexité et l'incertitude des modèles de prédiction basés sur les processus, et le fait que les changements climatiques prévus ne ressemblent en rien à ceux du passé, les modèles statistiques pourraient être les plus prometteurs pour permettre de prévoir la migration des espèces (Rizzo et Wilken 1992; Rehfeldt *et al.*, 1999; Natural Resources Canada 2002).

Afin de prédire la distribution des espèces dans un environnement enrichi en CO₂, les études statistiques utilisent les relations entre les paramètres climatiques et la distribution actuelle des espèces et des écosystèmes et 2) les paramètres climatiques telles que prédites par les modèles généraux et régionaux de circulation (e.g. Rizzo et Wilken 1992; Iverson et Prasad 1998; Iverson *et al.*, 1999; Mckeeney-Easterling *et al.*, 2000; Iverson et Prasad 2001; Iverson et Prasad 2002). Loehle (1998) et Loehle et LeBlanc (1996) allèguent que l'approche de l'évaluation de la distribution des espèces basée sur les paramètres climatiques par espèce est biaisée puisque dans ce modèle la croissance des espèces nordiques est limitée par des températures plus chaudes. D'après eux, la plupart des espèces ont une aire de répartition assez élargie pour supporter la croissance dans des conditions plus chaudes lorsque la disponibilité en eau n'est pas limitante. En conséquence, ils croient que les arbres pourraient ne pas subir des réductions de croissance ou de réductions de leurs aires de répartition comme le prédisent plusieurs auteurs en utilisant l'approche statistique (Loehle 1998). De plus, le remplacement d'espèces nordiques par d'autres provenant de régions plus méridionales se fera sur une période de plusieurs centaines d'années, donnant l'occasion aux aménagistes forestiers de prendre des mesures pour en diminuer les effets (Loehle 1998). Cette critique est entièrement basée sur les relations croissance-température et ne considère pas les possibles effets des changements climatiques sur le taux de survie, la croissance des espèces nouvellement immigrées (Woodward 1987; Schenk 1996), ni l'augmentation de la variabilité climatique (e.g. gel printanier tardif ou sécheresse) (Francis et Hengeveld 1998).

Changements de composition prévus pour le Québec

De manière générale, les études statistiques prédisant la distribution des espèces et des écosystèmes dans des conditions de 2 x CO₂ prévoient d'importants déplacements des habitats et de l'aire de répartition des espèces et des écosystèmes au Québec. Au niveau de la classification écologique générale – peut-être l'échelle la plus appropriée pour analyser le déplacement des écosystèmes causé par la climat (Rizzo et Wilken 1992) - Rizzo et Wilken (1992) prédisent un déplacement vers le nord des forêts tempérées froides (l'équivalent des forêts des Grands-Lacs/St-Laurent de Rowe (1972) à l'intérieur de l'aire de répartition actuelle de la forêt boréale, un agrandissement de l'étendue des forêts tempérées "modérées" (l'équivalent de la forêt Carolinienne de Rowe (1972) dans le sud-ouest du Québec, l'expansion de la zone transitoire forêt-prairie dans le centre-ouest du Québec, la quasi-disparition de la forêt sub-arctique remplacée par la forêt boréale, et peu de changement à la limite de l'arctique.

Un certain consensus existe parmi les études citées ci-haut sur l'effet des changements climatiques sur les espèces forestières. Par exemple, il est prévu que le pin rouge (*Pinus resinosa*) – une espèce des forêts tempérées froides - subira un déplacement d'environ 600-800 km vers le nord-est, une réduction de son aire de répartition mais verra son volume augmenter (Flannigan et Woodward 1994) – un patron cohérent avec l'abondance prédite du pollen de pin rouge (Overpeck *et al.*, 1991). On s'attend également à ce que l'aire de répartition de pin blanc (*P. strobus*) s'étende avec le réchauffement du climat (Jacobson Jr. et Dieffenbacker-Krall 1995). La latitude optimale de croissance de plusieurs espèces communes des forêts feuillues de l'est de l'amérique du nord pourraient migrer vers le nord, incluant le sapin baumier (*Abies balsamea*), le cèdre blanc (*Thuja occidentalis*), le pin rouge, l'érable à sucre (*A. saccharum*), le bouleau jaune (*Betula allerghaniensis*), le bouleau à papier (*B. papyrifera*), le frêne noir (*Fraxinus nigra*), le peuplier à grandes dents (*P. grandidentata*) et le peuplier faux-temple (Iverson et Prasad 1998; Iverson et Prasad 2002). Pour les deux espèces de chênes les plus communs du Québec, le chêne blanc (*Quercus alba*) et le chêne rouge (*Q. rubra*), la latitude de croissance optimale se déplacera vers le nord sous des conditions de

2 X CO₂ (Iverson et Prasad 2002), un scénario semblable à l'augmentation de l'abondance du chêne prévue par Overpeck *et al.*, 1991) pour le nord des Grands Lacs et la Nouvelle-Angleterre. Dans la forêt boréale méridionale Québécoise, le sapin baumier et le cèdre blanc pourraient voir leurs aires de répartition augmenter alors que celle du pin gris pourrait diminuer (*P. banksiana*), comme ce fut le cas avec la diminution de la fréquence des feux pendant le réchauffement de l'Holocène (Bergeron 1998).

Les études basées sur les processus étudient l'effet des changements climatiques sur la photosynthèse et la respiration, l'évapotranspiration, l'efficacité d'utilisation de l'eau des nutriments et de la lumière, la conductivité stomatale, etc. L'impact global sur la productivité des plantes dépendra de la combinaison de l'augmentation de la température et du CO₂ tout comme des contraintes de disponibilité des nutriments et de l'eau (Kirschbaum 2000). Même si un impact catastrophique sur la croissance des forêts semble improbable (Intergovernmental Panel on Climate Change 2001), le destin de certaines espèces demeure incertain et est dépendant d'une réponse écophysologique compétitive aux changements du climat (Kirschbaum 2000).

Facteurs affectant le déplacement des espèces et des écosystèmes

Plusieurs facteurs affecteront le patron de migration des espèces en fonction des nouveaux régimes de précipitations et de température. Ces facteurs rendent encore plus complexe l'analyse de l'effet des changements climatiques sur la distribution et l'abondance des espèces et des écosystèmes au Québec:

Géomorphologie – Le succès de migration d'une espèce donnée peut être compromis si l'endroit où le climat est adéquat pour l'espèce ne possède pas des conditions nutritives et de drainage lui permettant de s'établir et de croître adéquatement. Par exemple, plusieurs sections du Bouclier Canadien comportent des sols minces et de faible productivité qui ne seraient pas des habitats adéquats pour des espèces nécessitant des sols fertiles (e.g. frêne d'Amérique) même si le climat leur serait favorable (Rizzo et Wilken 1992).

Espèces exotiques – Les espèces exotiques pourraient jouer un rôle important dans la

composition des forêts au cours des prochaines décennies puisque plusieurs de ces espèces sont mieux adaptés pour coloniser de nouveaux sites que les espèces indigènes (Vitousek *et al.*, 1996; Iverson et Prasad 2002) et possèdent plusieurs caractéristiques qui permettent la dispersion (e.g. tolérance à une grande variété de conditions environnementales, plusieurs modes de reproduction et capacité de dispersion sur de longues distances (voir Simberloff 2000).

Fragmentation – La fragmentation des forêts pourrait limiter la migration de certaines espèces (Melillo *et al.*, 1990; Iverson *et al.*, 1999; Collingham et Huntley 2000; Schwartz *et al.*, 2001). La distribution et la proximité des peuplements avec leurs nouveaux habitats adéquats seront des éléments cruciaux du succès de la migration des espèces sur de longues distances. En effet, des populations d'arbres distantes de seulement un kilomètre peuvent être isolées du point de vue de la dispersion des gènes sur une période de 1000 ans (Greene et Johnson 1995). Les barrières à la migration incluent les lacs, les villes et villages, les zones agricoles ainsi que les grands parterres de coupe.

Interactions entre perturbations naturelles et anthropogéniques– Le régime de perturbations est un facteur critique pour la création et le maintien de la diversité biologique (Pickett et White 1985). Une partie importante de l'effet qu'auront les changements climatiques sur la végétation pourrait l'être par le biais de leur influence sur le régime de perturbations naturelles (Overpeck *et al.*, 1990; Weber et Flannigan 1997). Les changements au régime de perturbations provoqués par le climat pourraient mener à de nouveaux assemblages d'espèces (Martin 1993). Par exemple, l'augmentation du cycle et la diminution de la sévérité des feux tel que prédit par plusieurs auteurs (Flannigan *et al.*, 2000; Flannigan *et al.*, 2001; Bergeron et Archambault 1993) pour la forêt boréale de l'est canadien pourrait mener à des paysages dominés par des espèces de fin de succession comme le sapin baumier et le cèdre blanc, combinées à des espèces thermophiles provenant de la région des Grand Lacs et du St-Laurent (Flannigan *et al.*, 2001). Une diminution de l'intensité des feux pourrait aussi favoriser l'expansion vers le nord du pin rouge et du pin blanc (Bergeron et Flannigan 1995).

Les activités en milieu forestier tel que les coupes de bois, le combat des feux de forêt et la plantation d'arbres pourraient modifier l'effet qu'auront les changements climatiques sur la distribution des espèces et des écosystèmes. Voici quelques exemples de l'effet de différentes pratiques forestières sur la végétation:

- La plantation d'arbres génétiquement plus résilients aux changements climatiques pourrait affecter la distribution des espèces (Carter 1996)
- La plantation d'espèces d'arbres menacées de disparition sur des sites favorables pourrait affecter la distribution des espèces (Rehfeldt *et al.*, 1999)
- L'altération de la quantité de combustible au sol causée par la suppression des feux de forêt – laquelle a fait tripler le combustible au sol au cours des 50 dernières années (Clark 1990) – pourrait affecter le régime de feux lequel modifiera l'abondance et la distribution des espèces (Thompson *et al.*, 1998)
- L'altération de la disponibilité des semences forestières par les coupes pourrait affecter l'abondance de certaines espèces et leur capacité à migrer, tel que documenté pour le pin rouge et le pin blanc (Aird 1985).
- Les coupes forestières pourraient favoriser certaines espèces qui s'établissent bien après perturbations sévères comme le peuplier (*Populus ssp.*) (Hearnden *et al.*, 1992; Carleton et MacLellan 1994).

- 1. Des changements significatifs du potentiel des habitats pour les espèces d'arbres sont attendus et pourraient mener à une nouvelle composition des communautés végétales au Québec (Rizzo et Wilken 1992);**
- 2. La vitesse des changements climatiques est sans précédent et pourrait mener à la disparition locale ou à l'extinction d'espèces ayant une faible capacité de dispersion ou une aire de dispersion limitée (Thompson *et al.*, 1998);**
- 3. La capacité des espèces à migrer en réponse aux changements climatiques sera fortement influencée par les contraintes autoécologiques des espèces telles que la dispersion des semences, et par des facteurs comme la fragmentation des forêts, les pratiques de régénération et le régime de perturbations (Flannigan *et al.*, 2001).**

Santé des forêts

Insectes ravageurs

Bien que leur action soit moins spectaculaire que celle des incendies de forêt, les épidémies d'insectes jouent un rôle déterminant dans la dynamique forestière de la forêt québécoise (Bergeron 1998). Les épidémies les plus dommageables au Québec en forêt boréale sont celles causées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* (Clem.) (TBE), avec des dommages représentant plus de 235 millions de mètres cubes de bois lors de la dernière épidémie, soit l'équivalent de dix années de récolte pour l'industrie forestière (SOPFIM 2002). En forêt feuillue au Québec, c'est la livrée des forêts (*Malacosoma disstria* Hübner) qui est l'insecte le plus surveillé. Cet insecte s'attaque surtout au peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michaux) et à l'érable à sucre (*Acer saccharum*). Il a souvent été véhiculé que la livrée ne causait des dommages qui dépassent la réduction de croissance (Rose et Lindquist 1997), bien que des taux de mortalité élevés et des pertes de biomasses importantes aient déjà été rapportés (Brandt 1995; Barter et Cameron 1955).

Effets directs

De manière générale, des températures plus chaudes et un temps sec auront un effet positif sur la reproduction des insectes (Wellington 1948 dans Fleming et Candau 1998; Sanders *et al.*, 1978; Daniel et Myers 1995) et sur leur taux de développement (Harrington *et al.*, 2001; TBE :Lysyk 1989). Aussi, une saison estivale prolongée pourrait résulter en une plus grande population d'insectes à l'automne (Scarr 1998). Les sécheresses pourraient donc mener à des situations allant d'une augmentation de la défoliation moyenne (Fleming et Candau 1998) jusqu'à une augmentation de la fréquence des épidémies (Mattson et Haack 1987 dans Fleming et Candau 1998). En contrepartie, certaines phéromones sont moins stables à plus hautes températures, avec comme conséquence une réduction des capacités reproductives de certains insectes (Hedden 1988).

Une saison hivernale plus clémente augmente généralement le taux de survie des insectes (Williams 1995; Marcais *et al.*, 1996 dans Ayres et Lombardero 2000), quoiqu'une diminution de l'épaisseur de la neige pourrait en défavoriser certains (Ayres et Lombardero 2000). De manière générale, les espèces d'insectes qui hivernent au stade d'oeuf ou d'adulte seraient les plus susceptibles à profiter des nouvelles conditions climatiques (Virtanen *et al.*, 1998 dans Ayres et Lombardero 2000). La survie printanière de la tordeuse devrait s'améliorer avec une réduction de la fréquence des printemps frais et humides (Lucuik 1984 dans Fleming et Candau 1998) et des gels printaniers (Fleming et Volney (1995). Williams (1995) a aussi trouvé une relation entre la température minimale durant l'hiver et les précipitations avec la défoliation par la tordeuse occidentale de l'épinette dans le nord-ouest des États-Unis. Cette même température minimale durant l'hiver pourrait aussi jouer un rôle dans la synchronisation des populations de la livrée des forêts (Daniel et Myers 1995).

La distribution géographique de la grande majorité des insectes est plus restreinte que celle de leurs hôtes; leur distribution pourrait donc changer très rapidement en réponse à une amélioration des conditions climatiques dans une région donnée (MacLean 1983 dans Ayres et Lombardero 2000). Puisque la migration des insectes est beaucoup plus rapide que celle des arbres, il est possible que des insectes exotiques viennent qu'à s'établir à l'intérieur de l'aire des forêts tempérée ou boréale actuelle (Dale *et al.*, 2001). L'impact de cette migration est difficile à anticiper en considérant l'absence de coévolution et le grand nombre d'espèces d'insectes potentiellement impliquées, mais celui-ci pourrait être important. Il serait sans doute souhaitable de dresser une liste des insectes les plus susceptibles de migrer vers le nord et pour chacun d'eux les essences forestières potentiellement affectées.

Le taux de fécondité des insectes et les fortes populations dans des conditions épidémiques rendent ces espèces capables de s'adapter rapidement à de nouvelles conditions climatiques (Fleming et Volney 1995; Williams 1995). Par exemple, les populations de TBE peuvent atteindre jusqu'à $7,2 \times 10^{15}$ larves au quatrième stade larvaire (Fleming 1996 dans Fleming et Candau 1998) alors que le taux de mutation est

d'environ 10^{-5} à 10^{-4} (Sager et Ryan 1961 dans Fleming et Candau 1998), résultant en plusieurs rares génotypes potentiellement mieux adaptés aux nouvelles conditions climatiques.

Relations trophiques

Une des conséquences plausible d'une augmentation du carbone atmosphérique, et de la hausse de température qui l'accompagne, est une disparité dans la phénologie des insectes herbivores et de leurs plantes hôtes, en particulier pour les espèces printanières où l'éclosion des œufs doit être synchronisée avec le débourrement du feuillage (Harrington et al. 1999, et références citées dans cet article). Chez le papillon d'hiver, *Operophtera brumata*, dont la phénologie est hâtée par un réchauffement de la température, les données expérimentales indiquent que l'un de ses hôtes, le chêne pédonculé, suivrait la même tendance phénologique, alors qu'un hôte alternatif, l'épinette de Sitka, est peu affecté phénologiquement, entraînant une désynchronisation complète avec cet hôte. Ces résultats suggèrent qu'un réchauffement de la température peut réduire le nombre d'hôtes alternatifs des insectes herbivores. Cependant, une étude plus récente indique que le réchauffement des températures printanières affecte bel et bien le synchronisme entre l'émergence des larves du papillon d'hiver et le débourrement du chêne pédonculé en Europe (Visser et Holleman, 2001). Ces derniers résultats démontrent l'importance d'examiner un ensemble de facteurs, ici la phénologie, afin de pouvoir mieux prédire les conséquences des changements climatiques des espèces au cas par cas. En effet, une autre étude mettant cette fois l'emphase sur les variations nutritionnelles chez le chêne pédonculé exposé à une température plus élevée dans un environnement enrichi en CO₂, et les conséquences sur le développement larvaire des chenilles du papillon d'hiver, conclue globalement à une absence d'effet par compensation, i.e. les chenilles consomment plus de feuillage pour pallier à la baisse de la qualité nutritionnelle de leur diète (Buse et al., 1998). Ainsi, ces derniers résultats, bien qu'intéressants et utiles en soi – le chêne pédonculé risque des défoliations plus sévères en cas d'attaque, sont secondaires lorsqu'il est pris en compte les effets respectifs du

réchauffement sur les phénologies de l'insecte et de son hôte.

Le cas de cet insecte épidémique exemplifierait une situation où les changements climatiques n'exacerbent pas les risques d'herbivorie dans les peuplements forestiers, du moins si l'on ne considère pas l'herbivorie per capita. Il faut cependant noter que, dans les années récentes, de sévères épidémies du papillon d'hiver ont été rapportées dans les landes à callune en Écosse, la callune n'étant pourtant pas un hôte habituel, démontrant ainsi la capacité des insectes à s'adapter aux conditions changeantes (Kerslake et al., 1998). Les auteurs de cette étude, dans laquelle la réponse de l'insecte a été observée sur des plants exposés à des combinaisons variées de CO₂ et d'azote, concluent que les changements globaux expliqueraient les épidémies inusitées de l'insecte dans les landes Écossaises avec, pour effet, de favoriser la dominance des graminées dans ces milieux.

Le développement larvaire accéléré des insectes herbivores en fonction de la température peut avoir des effets qui s'élèvent le long de la chaîne trophique. Par exemple, il a été démontré que l'accélération du développement larvaire du papillon d'hiver avec l'augmentation des températures printanières en Europe entraîne une diminution des ressources disponibles en proies pour la mésange charbonnière lors de sa période de reproduction (Visser et al. 1998). Des expériences en microcosmes ont par ailleurs démontrées la plus grande susceptibilité des niveaux trophiques supérieurs aux effets du réchauffement (Petcher et al. 1999), confirmant que les conséquences du phénomène doivent être envisagées au-delà des réponses individuelles des différents groupes fonctionnels qui composent les communautés. Il est possible d'envisager également des effets qui transcendent les chaînes trophiques du haut vers le bas, par exemple dans le cas cette expérience menée en chambres à ciel ouvert où la concentration en CO₂ fut manipulée, sans pour autant que la température le soit, et dans lesquelles il fut observée une augmentation marquée du parasitisme chez des mineuses (Stiling et al. 1999).

Les projections des conséquences des changements climatiques sur la composition végétale prenant en compte l'herbivorie diffèrent largement de celles qui en font abstraction (Niemela et al., 2001). Les scénarios élaborés par ces derniers auteurs pour

trois régions boréales, et basés sur un recouplement des données paléontologiques, de la réponse des herbivores, de celles des plantes, et des projections de différents modèles climatiques, suggèrent des changements importants dans la physiognomie de ces régions. Dans le sud de la Fenno Scandinavie, l'herbivorie favoriserait les épinettes au détriment des pins et des essences décidues, alors que dans le nord, seuls les pins seraient défavorisés. Dans l'Alaska intérieur, il y aurait relaxation de l'herbivorie sur les espèces décidues, mais une augmentation sur les épinettes, renforçant probablement ainsi la fréquence des feux.

L'interaction entre la végétation et l'herbivorie dans un monde sous l'influence des changements climatiques est complexe car ces changements entraînent eux-mêmes des conséquences sur le cycle du carbone (Volney et Fleming, 2000). Actuellement, dans la forêt boréale canadienne, les insectes causes des pertes de matière ligneuse 1.3 à 2 fois supérieures à celles dues aux feux. Ceci entraîne un flux de carbone vers l'atmosphère qui, potentiellement, contribue à exacerber le phénomène du réchauffement.

Effets indirects

En plus des effets directs décrits plus haut, l'impact des changements climatiques sur les hôtes, les prédateurs, ainsi que les parasitoïdes et maladies pouvant affecter les insectes herbivores auront des répercussions indirectes sur les insectes (Ayres et Lombardero 2000).

Puisque la composition chimique des tissus des hôtes est influencée par la température, les précipitations, les radiations solaires et la concentration de CO₂, l'alimentation des insectes herbivores pourrait être indirectement affectée par les changements climatiques (Ayres et Lombardero 2000). En effet, la modification de la composition chimique du feuillage pourrait en affecter la qualité nutritionnelle, la digestibilité et les défenses chimiques. Par exemple, les sécheresses peuvent favoriser les insectes en augmentant la concentration de sucre dans le feuillage des hôtes (Scarr 1998). Plusieurs autres exemples sont cités dans la littérature relatifs aux concentrations des composées

secondaires (Bryant *et al.*, 1983), au ratio carbone-azote dans le feuillage (Scarr 1998; Lindroth *et al.*, 1993) ou à la production de tanins ou de résines (Green et Ryan 1972 dans Martinat 1988). L'importance de la qualité du feuillage a aussi été mentionnée. Une diminution de celle-ci, causée par des gels printaniers, a été associée à l'effondrement des populations de tordeuse des bourgeons de l'épinette pour au moins certaines régions affectées par l'épidémie (Fleming et Candau 1998). Il est pour l'instant difficile de prédire si le changement dans la composition chimique des plantes résultera en une diminution de la défoliation à cause de la présence de défenses chimiques ou en une augmentation de la défoliation à cause de la valeur nutritionnelle réduite du feuillage.

Une augmentation de la concentration de CO₂ atmosphérique représente une fertilisation entraînant un déséquilibre dans le rapport carbone:azote du tissu des plantes, surtout au niveau du feuillage. Ce déséquilibre a pour conséquence quasi universelle une allocation plus grande vers le métabolisme secondaire des composés à bases essentiellement carbonées, en particulier les composés phénoliques et les tannins issus de la voie de synthèse de l'acide shikimique, avec la notable exception des composés terpénoïdes issus de la voie de synthèse de l'acide mévalonique (Penuelas et Estiarte, 1998, et références citées dans cet article). L'altération des performances des insectes herbivores en réponse aux changements induits par l'enrichissement en CO₂ chez leurs plantes hôtes est variable, et semble dépendre de la combinaison entre l'espèce d'herbivore considérée et la plante hôte (Lindroth, 1996). La réponse semble cependant dépendre fortement de la capacité des insectes herbivores à remédier à la dilution de l'azote dans leur diète par une augmentation de leur consommation, dans les limites définies par leur tolérance à la présence d'une plus grande quantité de composés secondaires généralement néfastes pour leur croissance. Les conséquences globales de ces réponses à l'enrichissement en CO₂ sont que l'herbivorie augmenterait per capita, mais que les différences dans la tolérance aux variations dans la chimie secondaire des hôtes pourraient entraîner des modifications dans l'utilisation des hôtes par les différentes espèces d'insectes herbivores.

Un aspect important à considérer dans les scénarios de changements globaux est qu'il existe, parallèlement à l'augmentation du carbone atmosphérique, une augmentation de

l'apport en azote dans les écosystèmes reliée aux activités humaines (Aber et al., 1989). Cette double fertilisation peut mitiger les effets énoncés plus haut sur la performance des insectes herbivores (Hattenschwiler et Schafellner, 1999), et varier le patron spatial d'utilisation des hôtes en fonction de la distribution des dépôts d'azote de sources anthropiques.

Les changements climatiques pourraient aussi affecter la période de disponibilité des caractéristiques désirées du feuillage d'un hôte. Selon l'hypothèse d'un réchauffement du climat au printemps, le feuillage des hôtes pourrait se développer plus rapidement et entraîner une réduction de la période durant laquelle le jeune feuillage est disponible (Scarr 1998). Puisque les herbivores poikilothermiques se développent plus rapidement dans des conditions plus chaudes, ils pourraient être moins affectés que les herbivores à sang chaud (Scarr 1998). Bien que la survie de la tordeuse soit fortement liée au développement de son hôte (Volney et Fleming 2000), son excellent synchronisme fait en sorte qu'elle est très peu affectée par les variations climatiques (Régnière et You 1991 dans Fleming et Candau 1998).

La susceptibilité des peuplements forestiers aux insectes dépend de la composition, de la structure, de l'âge et de la santé des peuplements. Or, ces facteurs peuvent être influencés par les changements climatiques. Par exemple, l'effet des épidémies d'insectes sur la mortalité des peuplements varie selon l'hétérogénéité de la présence de l'hôte de l'insecte ravageur au niveau du peuplement et du paysage (TBE : Cappuccino *et al.*, 1998; livrée des forêts: Roland 1993; Cooke et Roland 2000). Dans un scénario de migration intégrée des écosystèmes, les insectes ravageurs comme la TBE suivraient le mouvement de déplacement des écosystèmes avec comme conséquence peu de changements au niveau des cycles d'épidémiques moyens. Dans le cas plus probable où les composantes d'un écosystème se déplaceraient de manière disjointe (voir Brooks *et al.*, 1998), les résultats sont plus ambivalents et semblent dépendre de la densité des arbres hôtes dans le peuplement au moment où le climat atteint certaines conditions. Deux cas possibles émergent des simulations qui impliquent la TBE: 1) dans le cas d'une faible densité initiale d'arbres-hôtes, la régénération de ces essences sera dominée par

celle des essences non-hôtes, 2) dans les cas où la densité d'arbres hôtes surpasse un certain seuil, le modèle prédit une coexistence à long terme de la TBE avec ceux-ci (Fleming et Candau 1998).

La plupart des insectes herbivores sont considérés comme étant nuisibles à cause de la nature cyclique des niveaux de populations, lesquels sont non seulement contrôlés par l'environnement, mais aussi par l'interaction des insectes avec les espèces prédatrices, pathogènes ou parasites. Les changements climatiques pourraient affecter les insectes herbivores par leurs effets indirectes sur les niveaux trophiques des autres insectes prédateurs, les pathogènes ou les parasites (Turchin et Taylor 1992 in Ayres et Lombardero 2000; Juillet 1964). Certains insectes pourraient donc atteindre des niveaux épidémiques si les nouvelles conditions climatiques s'éloignaient des conditions optimales de développement des espèces prédatrices, des pathogènes ou des parasites, même pour une courte période (Scarr 1998). Par exemple, la température optimale de développement pour la TBE est plus élevée que celle de plusieurs de ses espèces-prédatrices. Sachant que ces ennemis naturels jouent un rôle important dans la dynamique des populations de TBE (Stedinger 1984 dans Fleming et Candau 1998), il semble qu'une augmentation de température puisse favoriser la TBE.

Impact global des insectes sur forêt

D'après plusieurs auteurs (Fleming 1996; Karnosky *et al.*, 1999), les changements climatiques auront un impact sur la fréquence, la durée et la sévérité des épidémies d'insectes et donc sur le régime de perturbations en forêt naturelle. Au Québec, dans deux études récentes réalisées par dendrochronologie, Jardon *et al.*, (1994) et Jardon (2001) ont observé une augmentation de la sévérité des épidémies de TBE et de la téntrède du mélèze (*Pristiphora erichsonii* (Htg.) depuis le début de l'ère industrielle, quoique ces études ne fassent pas de liens directes avec le climat. Aussi, des indices laissent croire qu'un réchauffement apporterait une plus grande diversité d'insectes dans les latitudes nordiques (Dale *et al.*, 2001). Cependant, il est impossible de caractériser ces changements avec précision parce qu'il est difficile de prédire 1) la composition et la

structure futures de la forêt dans une région donnée 2) les insectes favorisés par les nouvelles conditions climatiques (Sandberg 1992) 3) les changements climatiques à l'échelle du paysage, et 4) la résistance des écosystèmes aux perturbations et leur capacité à récupérer.

Reconstruction des paléontomofaunes

Les études ayant porté sur la reconstruction des paléontomofaunes et de leur réponse aux changements climatiques à l'échelle géologique offrent des conclusions contradictoires. D'un côté, on soutient que ces entomofaunes sont demeurées relativement constantes dans le temps, même au cours des 7,000 dernières années dans le sud du Québec (Lavoie et al., 1997), alors qu'elles semblent avoir reflétés, dans le sud Ontarien, les changements dans la composition végétale qui ont accompagnés les variations climatiques depuis la fin de la dernière glaciation, il y a 13,500 ans (Schwert et al., 1985). Un autre type de reconstruction, basée celle-ci sur les dommages dus aux insectes herbivores, interprétables sur les feuilles fossiles retrouvées dans le sud du Wyoming, et qui datent de la période de réchauffement allant de la fin du Paléocène au début de l'Éocène, indique une augmentation, non seulement des dommages, mais également des types de dommages, en particulier chez les Bétulacées, avec le réchauffement du climat (Wilf et Labandeira, 1999). Une analyse similaire des feuilles fossilisées retrouvées dans les Montagnes Rocheuses des Etats-Unis pour la même période géologique indique par ailleurs une herbivorie plus intense sur les espèces décidues que sur les espèces à feuillage persistant (Wilf et al., 2001), indiquant la plus grande palatabilité du feuillage des premières espèces sur les secondes, comme c'est le cas de façon contemporaine.

Changements récents et en cours, migrations et dispersions

L'intérêt pour l'histoire naturelle en Europe remonte à suffisamment longtemps pour apprécier l'apport de cette source d'information dans les changements qui s'opèrent depuis la Révolution Industrielle dans la composition et la distribution de l'entomofaune

sur l'ancien continent. Burton (1998) rapporte que, depuis 1850, au moins 260 espèces de Lépidoptères ont modifié leur distribution, desquelles 190 l'ont fait vers le nord ou l'ouest. Kozar et David (1986) indiquent que plusieurs espèces d'insectes en Europe Centrale ont étendu leur distribution de 200 à 700 Km vers le nord en l'espace d'à peine 9 ans (1974-1983). Également, parmi 14 espèces qui apparaissent sous leur forme adulte tôt au printemps en Angleterre, 12 émergeaient de la saison hivernale dans les années 90 jusqu'à six semaines plus tôt que dans les années 70 (Burton, 1998). Des changements aussi spontanés sont aussi observables dans la faune des Microlépidoptères des Pays-Bas, pour lesquels la fenêtre phénologique est devenue environ 12 jours plus hâtive entre 1975 et 1994, principalement à cause de températures printanières plus élevées (Ellis et al., 1997).

Il n'est pas évident de comprendre comment des changements aussi rapides puissent survenir, en particulier lorsque l'on considère que les plantes dont se nourrissent ces herbivores ont une distribution moins plastique que ces derniers. Une étude plus détaillée, toujours en Europe, met en lumière quelques explications éclairant le phénomène. Parmi les 4 espèces étudiées en détail et pour lesquelles une expansion considérable de la distribution avait été observée en Angleterre durant les 20 dernières années, Thomas et al. (2001) rapportent que deux avaient pu occuper de nouveaux habitats alors qu'une plus grande proportion d'individus à propension migratrice était observée dans les populations fondatrices chez les deux autres espèces. Cette étude met en évidence les processus écologiques et évolutifs qui peuvent se manifester chez les insectes dans un monde en changement rapide.

- 1. Les insectes seront affectés directement par les changements de température, de précipitation et des concentrations de CO₂ et indirectement par la composition chimique des tissus des hôtes, la période de disponibilité des caractéristiques désirées du feuillage d'un hôte, la susceptibilité des peuplements forestiers et les pathogènes et parasites;**
- 2. On peut s'attendre à une augmentation de l'intensité des épidémies de certains insectes (voir Jardon *et al.*, 1994;), et à une plus grande diversité d'insectes, incluant des insectes exotiques (Dale *et al.*, 2001) ;**
- 3. Le changement dans le régime de perturbation pourrait à son tour affecter la structure et la composition de la forêt (Ayres et Lombardero 2000; Dale *et al.*, 2000; Bergeron *et al.*, 1998), au point de mener certaines espèces à l'extinction à l'échelle locale (Fleming 1996, mais voir Loehle 2000);**
- 4. Certaines épidémies sont fortement liées à d'autres perturbations ; une augmentation du cycle du feu pourrait affecter positivement la TBE (Bergeron et Leduc 1998);**
- 5. Les relations trophiques risquent d'être perturbées par les changements climatiques, entraînant des conséquences au niveau de la biodiversité;**
- 6. L'expansion vers le nord des insectes semble déjà amorcée en Europe, mais les données manquent pour l'Amérique du Nord;**
- 7. L'herbivorie en elle-même contribue à augmenter le flux de carbone vers le réservoir atmosphérique (Volney et Fleming, 2000); il apparaît donc important de comprendre les interactions entre l'herbivorie et les changements dans la composition végétale afin de rendre plus complets et réalistes les scénarios de changement global.**

Champignons et autres pathogènes

Les agents pathogènes agissent sensiblement de la même façon sur la forêt que les insectes. Leurs effets sont exprimés par un affaiblissement des individus pouvant aller jusqu'à leur mortalité, ceci à tous les stades de développement selon l'agent pathogène (Castello *et al.*, 1995). Selon la composition, la structure du peuplement et l'agent pathogène, on observera une mortalité arbre-par-arbre ou par groupes d'arbres, allant même jusqu'à la perturbation de peuplements entiers dans certains cas. L'impact d'un pathogène sur la structure et la composition forestière est donc variable et dépend, entre autres, de la composition initiale de la forêt (Menges et Loucks 1984; Castello *et al.*, 1995). Les pathogènes jouent un rôle important dans le maintien de la diversité des forêts (Van der Kamp 1991).

Très peu d'information de source québécoise est disponible sur l'effet des changements climatiques sur les pathogènes. Le paragraphe qui suit est adapté d'une revue de littérature produite par Ayres et Lombardero 2000.

Les changements climatiques pourraient affecter la présence de certains pathogènes puisque les changements de température, de précipitations, d'humidité du sol et de l'air affectent le succès de sporulation et d'établissement de plusieurs pathogènes forestiers (Brasier 1996). Tout comme pour les insectes, le climat affecte indirectement le succès de propagation des pathogènes en influençant la physiologie et les mécanismes de défense des arbres par des composées chimiques secondaires (Tissue *et al.*, 1996). Par exemple, des événements de vents forts, de verglas ou autres phénomènes pouvant causer des blessures aux arbres pourraient faciliter l'infection de pathogènes (Pearce R.B. 1996; Irland 1998). Cependant, contrairement aux études réalisées avec les insectes, les résultats des études faisant le lien entre les effets de l'environnement sur l'hôte et les pathogènes sont beaucoup plus équivoques (Matson et Waring 1984; Christiansen 1992; Christiansen et Fjone 1993; Kyto *et al.*, 1996). La génétique semble très importante dans le cas de certains pathogènes très virulent comme la maladie Hollandaise de l'orme, alors que pour les pathogènes comme *Armillaria* spp. (Pourridié-agaric) ou *Heterobasidion*

annosum (maladie du rond), la condition physiologique des hôtes serait plus importante. Évidemment, les changements climatiques pourraient également affecter indirectement les pathogènes en affectant d'autres organismes dont ils dépendent (Hatcher 1995; Paine *et al.*, 1997). Par exemple, l'expansion vers l'ouest de la maladie corticale du hêtre pourrait avoir été ralentie par des contraintes écologiques liées à l'insecte vecteur du champignon pathogène (Houston 1998).

Les champignons présents dans les sols forestiers pourraient aussi jouer un rôle déterminant dans la réponse des écosystèmes aux changements climatiques (O'Neill 1994 dans Greifenhagen 1998). En effet, la flore microbienne est impliquée dans plusieurs processus pédologiques tels que le cycle de carbone et des éléments nutritifs ou la formation de la structure du sol. Un changement dans l'abondance et la diversité des communautés microbiennes du sol à cause des changements climatiques pourrait avoir des répercussions importantes sur l'ensemble de l'écosystème forestier (tiré de Greifenhagen 1998):

- le taux de décomposition de la litière pourrait augmenter de 33% avec une augmentation de température de 3 °C (Cannell *et al.*, 1989; Schimmel 1995);
- à long terme, des sécheresses répétées pourraient causer des fluctuations dans l'abondance de la biomasse de la microfaune, diminuant la disponibilité des nutriments et la croissance des plantes (Lodge *et al.*, 1994);
- la migration de plusieurs espèces d'arbres pionnières pourrait dépendre du succès de la migration des mycorhizes (Lodge *et al.*, 1994).

Avec les connaissances actuelles, il est donc très difficile de prédire comment réagiront les pathogènes en fonction des changements climatiques. Des connaissances additionnelles des insectes et des facteurs causant les cycles épidémiques sont nécessaires afin de prévoir l'effet des pathogènes sur le régime des perturbations naturelles sous de nouvelles conditions climatiques (Ayres et Lombardero 2000). Afin de prédire l'effet des changements climatiques sur les processus pédologiques, une meilleure compréhension des processus microbiens et de la diversité microbienne et de leurs variations en fonction

du site, de la composition forestière, de la température et de l'humidité est nécessaire (Greifenhagen 1998).

- 1. Les changements climatiques affecteront directement et indirectement le succès de sporulation et d'établissement de plusieurs pathogènes forestiers (Brasier, 1996 dans Ayres et Lombardero 2000);**
- 2. La résistance des arbres à certains pathogènes est un caractère fortement héritable, donc moins susceptible aux effets de l'environnement;**
- 3. Les champignons présents dans les sols forestiers pourraient jouer un rôle déterminant dans la réponse des écosystèmes aux changements climatiques (O'Neill 94 dans Greifenhagen 1998).**

Perturbations naturelles

Les perturbations naturelles contribuent au dynamisme de l'écosystème forestier. Ainsi, afin de comprendre l'effet des changements climatiques sur l'écosystème, il importe d'en regarder les effets sur les différents agents perturbateurs. Cette section présente les perspectives les plus récentes en matière de changements des régimes des perturbations naturelles. Nous traiterons des régimes de feux ainsi que des épisodes de vents extrêmes et de verglas.

Incendies forestiers

Le feu joue un rôle important dans la composition et l'évolution de la forêt boréale canadienne depuis le début de la période post-glaciaire et représente un élément essentiel du renouvellement de plusieurs écosystèmes (Weber et Stocks 1998). La structure et la composition de la forêt, la topographie et les facteurs météorologiques et climatiques comme les précipitations, l'humidité relative, la température de l'air et la vitesse des vents influent sur le comportement des incendies forestiers (Weber et Flannigan 1997; Carcaillet *et al.*, 2001; Dale *et al.*, 2001). Le climat étant possiblement le plus important de ces facteurs (Carcaillet *et al.*, 2001), il est donc fort possible que les changements climatiques futurs provoquent des modifications importantes dans le régime de feux au cours des prochaines années (Overpeck *et al.*, 1990). Pour les forêts boréales, certains auteurs avancent qu'un changement du régime de feux dû aux changements climatiques pourrait avoir un effet plus important sur la dynamique forestière que l'effet direct des changements climatiques sur ces forêts (Flannigan *et al.*, 1998; Bergeron et Archambault 1993). Des répercussions importantes sur le cycle de carbone sont également anticipées (Schimel et Baker 2002; Weber et Flannigan 1997).

Fréquence et occurrence des incendies de forêt

Plusieurs chercheurs ont tenté de prédire l'effet d'un réchauffement global et d'une augmentation des concentrations de CO₂ sur le régime de feux au Canada et au Québec.

Pour ce faire, certains auteurs (Johnson *et al.*, 1999; Bergeron *et al.*, 2001; Podur *et al.*, 2002) ont utilisé des archives et/ou des données issues de la dendrochronologie afin de relier les conditions climatiques des derniers siècles à la fréquence¹ des feux de forêt. Une autre méthode consiste à utiliser des modèles d'évaluation des risques d'incendie de forêt (par exemple l'indice forêt-météo canadien) en fonction des conditions climatiques prédites par un ou des modèles de circulation générale (MCG).

Au début des années 1990, l'hypothèse selon laquelle il existait une relation universellement positive entre l'incidence des feux et l'augmentation de la température avait été émise (Clark 1998a; Overpeck *et al.*, 1990; Flannigan et van Wagner 1991). Toutefois, plusieurs études récentes concluent que l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère aura un effet variable sur le régime de feux au Canada (Tableau 2). En effet, la fréquence des incendies pourrait augmenter dans une grande partie des forêts de l'Ouest canadien, alors que l'effet pourrait être inverse au Québec et dans l'est du Canada (Stocks *et al.*, 1998; Bergeron et Archambault 1993). Cette différence dans les prévisions est principalement due aux variations des niveaux de précipitations actuels et prévus dans les différentes régions du pays. Au Québec, les études de Bergeron (Bergeron *et al.*, 2001; Bergeron 1998; Bergeron et Flannigan 1995; Bergeron 1991; Bergeron et Archambault 1993), réalisées principalement dans la région du lac Duparquet, démontrent qu'une hausse de la température pourrait être plus que compensée par une augmentation de l'abondance et une meilleure répartition temporelle des précipitations ; ainsi, les changements climatiques seraient susceptibles d'entraîner une diminution des incendies de forêt (Bergeron 1998). Stocks *et al.*, (1998) en sont venus à des conclusions similaires en utilisant des modèles généraux de circulation et des données météorologiques. De plus, cette conclusion s'accorde avec l'affirmation de Flannigan et Harrington 1983), selon laquelle le niveau de précipitations est le facteur qui contrôle le

¹ Dans ce document, la fréquence des feux est définie comme étant la superficie brûlée annuellement (voir Bergeron *et al.*, 2001) ce qui correspond à l'inverse du cycle de feux (Johnson *et al.*, 1999).

plus la fréquence des feux de forêt au Canada. Afin de prédire l'effet des changements climatiques sur le régime de feu à l'échelle régionale et locale, des modèles de prédiction spatio-temporels permettant d'estimer les précipitations de manière plus précise seront nécessaires. En outre, puisque la séquence des précipitations est une meilleure variable prédictive du risque de feu que les précipitations totales (Flannigan et Harrington 1983 dans Flannigan et van Wagner 1991), il est important de disposer de cette information afin de pouvoir l'intégrer aux prochaines simulations, quoique le niveau d'incertitude pour les précipitations restera important, surtout pour l'été.

Types et intensité des incendies de forêt

En plus des changements prévisibles sur la fréquence et l'occurrence des feux de forêt, les changements climatiques pourraient avoir un effet sur la sévérité des feux (Fosberg 1998 dans Weber et Stocks 1998; Flannigan *et al.*, 2000) ou le type de feux (Flannigan *et al.*, 2000). Ces deux caractéristiques, susceptibles d'affecter de manière importante la mosaïque forestière et les successions végétales (Flannigan *et al.*, 2000), sont pratiquement impossibles à évaluer avec les outils actuels.

Saison des incendies de forêt

Wotton et Flannigan (1993) ont spécifiquement étudié l'effet d'un niveau 2 X CO₂ sur la longueur de la saison des incendies de forêt et concluent à une augmentation de la longueur de la saison des incendies de forêt d'environ 27 jours pour le Québec. Une autre étude, portant sur les dangers d'incendies mensuels, montre que la saison de feu devrait débiter plus tôt au printemps (Stocks *et al.*, 1998).

Foudre

Il est reconnu par plusieurs auteurs que les changements climatiques auront un effet sur la foudre, laquelle pourrait à son tour affecter l'occurrence et la fréquence des incendies de forêt (Bergeron *et al.*, 2001; Flannigan *et al.*, 2000). Au Canada, environ 35 % des feux sont causés par la foudre; ces feux représentent 85 % de la superficie brûlée (Weber

et Stocks 1998). Dans une étude réalisée à l'aide d'un modèle de circulation générale, Price et Rind (1994) prévoient qu'une hausse des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère entraînera une augmentation des orages électriques dans l'hémisphère Nord.

Bien que les feux de forêt soient un phénomène naturel, on peut supposer que la quantité supplémentaire de carbone émise suite à une augmentation des superficies de forêts brûlées aura un effet de rétroaction positif résultant en une augmentation de la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Amiro *et al.*, 2001; McAlpine 1998; Weber et Stocks 1998).

Contrairement aux feux de la forêt boréale, les feux en forêt feuillue sont généralement des feux de surface de faible intensité (Doyon et Souglavinski 2002) puisque le feuillage particulièrement ininflammable des espèces décidues ne constitue pas un combustible favorable au développement du feu de couronnes (Patterson et al. 1983). Bien que les feux soient de faible intensité, ces derniers jouent un rôle écologique important. Par exemple, suite au passage d'un feu, on observera une diminution de l'abondance de la végétation du sous-bois telles les espèces arbustives, herbacées ainsi que la régénération pré-établie. Cette réduction de la compétition basse amène une disponibilité accrue et soudaine des ressources du sol (Dunn et al. 1982) favorisant les individus ayant survécus et ceux qui s'installeront rapidement. Les changements climatiques pourraient donc avoir un effet sur le régime de feu en forêt feuillue, bien que son rôle dans le régime de perturbations naturelles soit moins prépondérant qu'en forêt boréale.

Effets indirects

Les risques d'incendies de forêts ne sont pas indépendants des épidémies d'insectes (Bergeron et Leduc 1998). Par exemple, il a été démontré que la TBE a tendance à faire augmenter les risques d'incendies de forêts (Fleming et Candau 1998; Fleming 2000) et que les risques de feux sont plus élevés pendant la période comprise entre 5 et 8 ans après l'attaque à cause de la quantité de débris ligneux au sol provenant de cimes brisées et d'arbres renversés (Stocks *et al.*, 1998). Cependant, dans le cas québécois, où l'on prévoit une augmentation du cycle de feux et donc un potentiel vieillissement des

peuplements résultant en une plus grande susceptibilité aux attaques par la TBE, le résultat global de cette interaction est moins facilement prévisible.

- 1. En raison de l'augmentation anticipée des précipitations, on s'attend à une diminution de la fréquence des incendies de forêt pour plusieurs régions du Québec (Bergeron 1998).**
- 2. On s'attend à un prolongement de la saison des incendies de forêt au Québec (Wotton et Flannigan 1993).**
- 3. Plusieurs facteurs, comme par exemple les épidémies de la tordeuse de bourgeons de l'épinette ou le déplacement des écosystèmes, affecteront la fréquence des incendies**
- 4. Les changements climatiques pourraient avoir un effet sur le régime de feu en forêt feuillue, bien que son rôle dans le régime de perturbations soit moins prépondérant qu'en forêt boréale.**

Tableau 3 – Auteur, région étudiée, outils et constats des principales études réalisées sur les incendies de forêt relatives au Québec

Auteur	Région	Outils / période	Constat
Stocks <i>et al.</i> , 1998	Canada	4 modèles généraux de circulation données météo 1980 – indice forêt-météo Van Wagner 1987	début de la saison de feu plus tôt au printemps au Québec diminution du danger d'incendie de forêt mensuel au Québec
Bergeron 1998	Nord-ouest du Québec	dendrochronologie MGC indice forêt-météo projection 2x CO ₂	diminution de la fréquence des feux avec le réchauffement à venir applicable à une grande partie de la forêt boréale
Bergeron <i>et al.</i> , 2001	Est de l'Ontario et centre du Qc	documents d'historiques de feux dendrochronologie 1700- photos aériennes	moins de grands feux de forêt diminution de la fréquence des incendies forestiers
Podur <i>et al.</i> , 2002	Ontario et Canada	documents écrits d'historique de feux 1917-2000	augmentation des superficies brûlées en Ontario, dans le nord-ouest de l'Ontario et au Canada
Flannigan <i>et al.</i> , 2001	Canada	indice forêt météo MGC et RCM projection 2x CO ₂	augmentation des risques de feux de forêt en général en Canada diminution du risque dans l'est du Canada
Flannigan <i>et al.</i> , 2000	Amérique du nord	deux modèles généraux de circulation Canadian forest fire weather index projection 2x CO ₂	augmentation des feux de forêt en Amérique du nord saison de feux plus longue
Flannigan et van Wagner 1991	6 stations au Canada	trois modèles généraux de circulation	hausse de 46 % des superficies brûlées
Flannigan <i>et al.</i> , 1998	Amérique du nord et Europe	projection 2x CO ₂ MGC indice forêt-météo	diminution de la fréquence des feux au Québec
McAlpine 1998	Ontario	indice forêt météo projection 2 x CO ₂	augmentation du danger d'incendie de forêt

MGC : modèle général de circulation; MRC : modèle régional de circulation

Chablis

Le chablis représente la perturbation naturelle à grande échelle prédominante des forêts nordiques tempérées du nord-est et du centre-nord de l'Amérique du nord (Canham *et al.*, 2001) et joue aussi un rôle important en forêt boréale. Ce type de perturbation, causé par les vents violents provenant d'orages, d'ouragans ou de tornades (Canham et Loucks 1984; Peterson et Pickett 1991; Foster et Boose 1992), perturbe la forêt au niveau des arbres individuels jusqu'à des superficies de plusieurs hectares.

Bien que les chablis soit un phénomène localisé, les vents violents causant les chablis sont le produit de circonstances climatiques de grandes échelles. Ils sont par conséquent potentiellement affectés par les changements climatiques attendus (Dale *et al.*, 2001). La plupart des modèles de changements climatiques prédisent une augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes de vents violents et des tornades (O'Hare ; Pearce 1995 dans Peterson 2000; Berz 1993 dans Dale *et al.*, 2001).

Les changements climatiques pourraient également affecter la susceptibilité des peuplements forestiers aux dommages causés par les vents violents. En effet, plusieurs facteurs affectant la susceptibilité des peuplements aux vents seront potentiellement affectés par les nouvelles conditions climatiques : l'humidité et la profondeur du sol, la densité du peuplement, la rugosité de la canopée ainsi que les caractéristiques des arbres telles que la grosseur, l'essence, la profondeur d'enracinement, la résistance du bois (Peterson 2000; Veblen *et al.*, 2001). Aussi, certaines pratiques sylvicoles comme les coupes de jardinage arbre par arbre ou la rétention systématique et obligatoire de bandes le long des cours d'eau pourraient avoir augmenté la susceptibilité des peuplements au chablis (Ruel 1995). Il est donc très difficile de prévoir l'effet des changements climatiques sur ce type de perturbation.

Verglas

Le verglas se produit lorsque qu'une couche d'air chaud se forme entre deux masses d'air froid et près de la surface de la terre (Cortinas 1999; Milton et Bourque 1999; Irland 2000). Les précipitations se liquéfient en passant au travers de l'air chaud puis sont refroidies rapidement par la couche d'air froid, avant de geler instantanément au contact d'une surface solide comme le sol, les édifices ou les arbres (Zerr 1997; Milton et Bourque 1999). L'accumulation de glace sur les arbres peut augmenter considérablement leur poids, provoquant des dommages aux branches allant jusqu'à la cassure et dans certains cas causant la mort de l'arbre par renversement, pliage ou cassure du tronc. La sévérité des dommages augmente lorsque la tempête de verglas est combinée avec des vents violents (Lortie 1979; Bruederle et Stearns 1985; Melancon et Lechowicz 1987; Rebertus *et al.*, 1997), est précédée de chutes de neige (Irland 2000), ou lorsque des températures sous le point de congélation persistent après le verglas (Downs 1938; Goebel et Deitschman 1967; Sisinni *et al.*, 1995).

Impacts sur la forêt

Les tempêtes de verglas sont reconnues comme jouant un rôle important dans le régime de perturbations des forêts feuillues en Amérique du Nord, et particulièrement dans une bande latitudinale allant du Wisconsin jusqu'au Nouveau Brunswick (Lemon 1961; Proulx et Greene 2001; Proulx et Greene 2001). Au Québec, elles se produisent dans l'ensemble de la province et les tempêtes de faible intensité (< 1 cm d'accumulation de glace) sont fréquentes se produisant en moyenne jusqu'à 12 fois par année dans certaines régions (LaFlamme et Périard 1996). Les tempêtes très sévères se produisent rarement; par exemple, la tempête d'une durée de 10 jours qui a frappé le sud de l'Ontario, le Québec et le nord-est américain en janvier 1998 – la plus sévère tempête de verglas jamais enregistrée (Hooper *et al.*, 2001) – avec des dépôts de glace jusqu'à 10 cm d'épaisseur (Milton et Bourque 1999) aurait un cycle de récurrence d'environ 700-1000 ans (LaFlamme et Périard 1996).

Les effets du verglas sur la dynamique de succession, la composition, la structure et les fonctions des forêts dépendent de facteurs écologiques, topographiques et climatiques (voir Van Dyke (1999) pour une revue complète). Ces facteurs incluent la structure et la composition des peuplements avant perturbation, l'orientation, la pente, l'élévation, l'exposition aux vents ainsi que la sévérité de la tempête (e.g. Lemon 1961; Bruederle et Stearns 1985; Melancon et Lechowicz 1987; Boemer *et al.*, 1988; De Steven *et al.*, 1991; Seischab *et al.*, 1993; Hauer *et al.*, 1993; Amateis et H.E. Burkhart 1996; Nykanen *et al.*, 1997). Proulx et Greene (2001) affirment que la plupart des études réalisées à ce jour sur les tempêtes de verglas n'ont étudié que les impacts du verglas en fonction des attributs de site/peuplement et de l'importance de l'évènement catastrophique, et que les impacts sur l'écologie des forêts dépendront essentiellement de la hauteur des arbres et de l'épaisseur du verglas. Aussi, il semble que les forêts feuillues, que certains auteurs croyaient plus susceptibles au verglas que les forêts résineuses (Deuber 1941; Carvell *et al.*, 1957), sont passablement résilientes aux tempêtes de verglas. Par exemple, l'évaluation des dommages suite à la tempête de 1998 dans le nord de l'état de New-York montre que plusieurs peuplements ont souffert de graves dommages, et que dans certains cas ces dommages auraient causer des modifications à la structure (Rubin et Manion 2001). Cependant, ces changements sont probablement insuffisants pour modifier la relation grosseur-structure de ces forêts au niveau du paysage sur une longue période (Manion *et al.*, 2001).

Comment les changements climatiques affecteront les tempêtes de verglas?

Les conséquences les plus probables des changements climatiques sur l'intensité, l'étendue et la fréquence des tempêtes de verglas sont inconnues. Même si la littérature sur les tempêtes de verglas date du début des années 1900, aucune étude a porté spécifiquement sur cet aspect. Tout porte à croire que la fréquence des températures près du point de congélation augmentera pendant l'hiver dans le sud du Canada au cours du prochain siècle. Ce changement au niveau de la température, jumelé à l'augmentation des précipitations prévue par les modèles climatiques pour l'est du pays (e.g. Flannigan *et*

al., 2001), pourrait causer une augmentation de la fréquence des tempêtes de verglas (Irland 2000; Dale *et al.*, 2001; Environment Canada 2002). Aussi, le réchauffement atmosphérique pourrait causer un déplacement vers le nord et en altitude des secteurs les plus susceptibles au verglas. Cependant, le niveau de certitude pour ces prédictions est très faible puisque les tempêtes de verglas sont le résultat d'une combinaison d'au moins deux conditions météorologiques indépendantes : de l'air chaud et humide en altitude, et de l'air chaud en surface (Milton et Bourque 1999). Les changements climatiques pourraient affecter la fréquence et la durée de chacune de ces conditions de manière différente, rendant les changements au patron des tempêtes de verglas très difficiles à prédire. Les effets à long terme d'un patron de tempêtes modifié est encore plus difficile à prévoir; plusieurs auteurs s'entendent pour dire que les effets à moyen et long terme (>30 years) des tempêtes de verglas sur les forêts nécessitent plus de recherche (Van Dyke 1999; Irland 2000).

Conclusion

Bien que l'effet des changements climatiques soit encore difficilement perceptible par la population dans ses activités quotidiennes, les effets des changements climatiques sur les forêts québécoises sont déjà détectables. Avec l'information dont nous disposons aujourd'hui, il est possible d'affirmer que les changements climatiques auront des effets importants sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers québécois au cours des prochaines décennies. L'effet exact, et même parfois les grandes tendances, qu'auront les changements climatiques sur les différents aspects des forêts Québécoises est cependant très difficile à prévoir. En particulier, les prédictions ne peuvent pas être basées sur la simple sommation des effets indépendants. De plus, les différents éléments du fonctionnement et de la dynamique des écosystèmes forestiers sont tous liés et interagissent ensemble, et nonobstant les changements climatiques, leurs interactions sont très mal comprises. Contrairement à l'agriculture où la monoculture s'impose et l'environnement de croissance est contrôlé, les forêts sont des écosystèmes excessivement complexes où les processus naturels dominent. Prédire avec précision l'effet des changements climatiques sur le fonctionnement et la dynamique des forêts est actuellement impossible.

Cette revue de littérature, qui visait spécifiquement les forêts québécoises, a été réalisée en mettant l'accent sur les études réalisées au Québec. Elle aura réussi à faire le point sur les connaissances actuelles ayant trait aux impacts possibles des changements climatiques sur les différentes fonctions des écosystèmes forestiers québécois, bien que ce travail mériterait d'être révisé, complété et mis à jour au cours des prochaines années. Il nous apparaît clair que des connaissances additionnelles sont requises afin de permettre des évaluations plus précises de l'effet des changements climatiques à long terme sur les forêts québécoises et de permettre de développer des stratégies d'atténuation. À ce sujet, les modèles régionaux de circulation attendus pour les prochaines années permettront de réajuster le tir et de mieux évaluer le risque.

Bibliographie

- Aber, J.D., K.J. Nadelhoffer, P. Steudler et J.M. Melillo. 1989. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience* 39: 378-386.
- Aird, P.L. (1985) Praise of Pine: The Eastern White Pine and Red Pine Harvest from Ontario's Crown Forests. Can. For. Serv. Rep. No. PI-X-52.
- Amateis, R.L. et H.E. Burkhardt (1996) Impact of heavy glaze in a loblolly pine spacing trial. *Southern Journal of Applied Forestry* 20: 151-155.
- Amiro, B.D., Todd, J.B., Wotton, B.M., Logan, K.A., Flannigan, M.D., Stocks, B.J., Mason, J.A., Martell, D.L. et Hirsch, K.G. (2001) Direct Carbon Emissions From Canadian Forest Fires, 1959-1999. *Revue canadienne de recherche forestière* 31: 512-525.
- Ashburn, A.K. et R.L. Lindroth. 2001. Effects of elevated atmospheric carbon dioxide and ozone on canopy insect biodiversity. Affiche présentée à 86ème Réunion Annuelle de la Ecological Society of America, Madison, Wi., USA, Août 2001.
- Association des manufacturiers de bois de sciage du Québec. (2003) Le québec forestier. La forêt au coeur de notre avenir. <http://www.quebecforestier.com/PolForest-F.pdf> Dernière visite février 2003.
- Auclair, A.N.D., Lill, J.T. et Revenga, C. (1996) The role of climate variability and global warming in the dieback of northern hardwoods. *Water Air and Soil Pollution* 91: 163-186.
- Ayres, M.P. et Lombardero, M.J. (2000) Assessing the Consequences of Global Change for Forest Disturbance From Herbivores and Pathogens. *Science of the Total Environment* 262: 263-286.
- Barter, G.W. et Cameron, D.G. (1955) Some effects of defoliation by the forest tent caterpillar. Can. Dep. Agric., For. Biol. Div. Ottawa, Ontario. Rep. Bimon. Prog. Rep. 11(6):1.
- Battaglia, M.C. et Beadle, C.L.S. (1996) Photosynthetic temperature responses of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. *Tree Physiology* 16: 81-89.
- Bazzaz, F.A. (1996) *Plants in Changing Environments*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Beaubien, E.G. et Freeland, H.J. (2000) Spring Phenology Trends in Alberta, Canada: Links to Ocean Temperature. *International Journal of Biometeorology* 44: 53-59.
- Bergeron, Y. (1991) The influence of island and mainland lakeshore landscapes on boreal forest fire regimes. *Ecology* 92: 1982-1992.
- Bergeron, Y. (1998) Consequences of Climate Changes on Fire Frequency and Forest Composition in the Southwestern Boreal Forest of Quebec. *Geographie Physique Et Quatenaire* 52: 167-173.
- Bergeron, Y. et Archambault, S. (1993) Decrease of forest fires in Quebec's southern boreal zone and its relation to global warming since the end of the Little Ice Age. *The Holocene* 3: 255-259.
- Bergeron, Y., Engelmark, O., Harvey, B., Morin, H. et Sirois, L. (1998) Key issues in disturbance dynamics in boreal forests: Introduction. *Journal of vegetation science*. 9: 464-468.

- Bergeron, Y. et Flannigan, M.D. (1995) Predicting the effects of climate change on fire frequency in the southeastern Canadian boreal forest. *Water, air, and soil pollution* 82: 437-444.
- Bergeron, Y., Gauthier, S., Kafka, V., Lefort, P. et Lesieur, D. (2001) Natural Fire Frequency for the Eastern Canadian Boreal Forest: Consequences for Sustainable Forestry. *Revue canadienne de recherche forestière* 31: 384-391.
- Bergeron, Y. et Leduc, A. (1998) Relationships between change in fire frequency and mortality due to spruce budworm outbreaks in the southern Canadian boreal forest. *Journal of vegetation science*. 9: 492-500.
- Bergsten, U., Goulet, F., Lundmark, T. et Lofvenius, M.O. (2001) Frost Heaving in a Boreal Soil in Relation to Soil Scarification and Snow Cover. *Revue canadienne de recherche forestière* 31: 1084-1092.
- Berz, G.A. (1993) Global warming and the insurance industry. *Interdisciplinary Science Reviews* 18: 120-125.
- Boemer, R.E.J., Runge, S.D., Cho, D.S. et Kooser, J.G. (1988) Localized ice storm damage in an Appalachian plateau watershed. *American Midland Naturalist* 119: 199-208.
- Brandt, J.P. (1995) Forest insect- and disease-caused impacts to timber resources of west-central Canada: 1988-1992. Canadian Forest Service. Northwest Region. Northern Forestry Centre. Rep. Information report NOR-X-341. 28p.
- Brasier, C.M. (1996) *Phytophthora cinnamomi* and oak decline in southern Europe: environmental constraints including climate change. *Annals of Forest Science* 347-358.
- Brooks, J.R., Flanagan, L.B. et Ehleringer, J.R. (1998) Responses of Boreal Conifers to Climate Fluctuations: Indications From Tree-Ring Widths and Carbon Isotope Analyses. *Revue canadienne de recherche forestière* 28: 524-533.
- Bruederle, L.P. et Stearns, F.W. (1985) Ice storm damage to a southern Wisconsin mesic forest. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 112: 167-175.
- Bryant, J.P., Chapin III, F.S. et Klein, D.R. (1983) Carbon/nutrient balance of boreal plants in relation to vertebrate herbivory. *Oikos* 40: 357-362.
- Burton, J.F. 1998. The apparent effects of climatic changes since 1850 on European Lepidoptera. *Mémoires de la Société Royale Belge d'Entomologie* 38: 125. Canham, C.D. et Loucks, O.L. (1984) Catastrophic windthrow in the presettlement forests of Wisconsin. *Ecology* 65: 803-809.
- Buse, A., J.E.G. Good, S. Dury et C.M. Perrins. 1998. Effects of elevated temperature and carbon dioxide on the nutritional quality of leaves of oak (*Quercus robur* L.) as food for the winter moth (*Operophtera brumata* L.). *Functional Ecology* 12 (5): 742-749.
- Canham, C.D., Papaik, M.J. et Latty, E.F. (2001) Interspecific variation in susceptibility to windthrow as a function of tree size and storm severity for northern temperate tree species. *Revue canadienne de recherche forestière* 31: 1-10.
- Cannell, M.G.R., Grace, J. et Booth, A. (1989) Possible impacts of climatic warming on trees and forests in the United Kingdom: A review. *Forestry* 62: 337-364.
- Cappuccino, N., Lavertu, D., Bergeron, Y. et Régnière, J. (1998) Spruce budworm impact, abundance and parasitism rate in a patchy landscape. *Oecologia* 114: 236-242.

- Carcaillet, C., Bergeron, Y., Richard, P.J.H., Fréchette, B., Gauthier, S. et Prairie, Y.T. (2001) Change in the fire frequency in the eastern Canadian boreal forest during the Holocene: does vegetation composition or climate trigger the fire regime? *The Journal of ecology* 89: 930-946.
- Carleton, T.J. et MacLellan, P. (1994) Woody vegetation responses to fire versus clearcut logging: a comparative survey in the central Canadian boreal forest. *Ecoscience* 1: 141-152.
- Carter, K.K. (1996) Provenance tests as indicators of response to climate change in 10 temperate tree species. *Revue canadienne de recherche forestière* 26: 1089-1095.
- Carvell, K.L., Tryon, E.H. et True, R.P. (1957) Effects of glaze on the development of Appalachian hardwoods. *Journal of Forestry* 55: 130-132.
- Caspersen, J.P., Pacala, S.W., Jenkins, J.C., Hurtt, G.C., Moorcroft, P.R. et Birdsey, R.A. (2000) Contributions of land-use history to carbon accumulation in U.S. forests. *Science* 290: 1148-1151.
- Castello, J.D., Leopold, D.J. et Smallidge, P.J. (1995) Pathogens, patterns, and processes in forest ecosystems. *Bioscience* 45: 16-24.
- Christiansen, E. (1992) After-effects of drought did not predispose young *Picea abies* to infection by the bark beetle-transmitted blue-stain fungus *Ophiostoma polonicum*. *Scand J For Res* 7: 557-569.
- Christiansen, E. et Fjone, G. (1993) Pruning enhances the susceptibility of *Picea abies* to infection by the bark beetle-transmitted blue-stain fungus *Ophiostoma polonicum*. *Scand J For Res* 8: 235-245.
- Chuine, I., Cambon, G. et Comtois, P. (2000) Scaling phenology from the local to the regional level: advances from species-specific phenological models. *Global change biology* 6: 943-952.
- Churkina, G. et Running, S. (2000) Investigating the Balance Between Timber Harvest and Productivity of Global Coniferous Forests Under Global Change. *Climatic Change* 47: 167-191.
- Churkina, G. et Running, S.W. (1998) Contrasting Climatic Controls on the Estimated Productivity of Global Terrestrial Biomes. *Ecosystems* 1: 206-215.
- Clark, J.S. (1990) Twentieth century climate change, fire suppression, and forest production in northwestern Minnesota. *Revue canadienne de recherche forestière* 20: 219-232.
- Clark, J.S. (1998a) Effet of climate change on fire regimes in north-western Minnesota. *Nature* 334: 233-235.
- Clark, J.S. (1998b) Why Trees Migrate so Fast: Confronting Theory with Dispersal Biology and the Paleorecord. *Am. Nat.* 152: 204-224.
- Collingham, Y.C. et Huntley, B. (2000) Impacts of Habitat Fragmentation and Patch Size Upon Migration Rates. *Ecological Applications* 10: 131-144.
- Colombo, S.J. (1998a) Plant physiological responses to a changing environment. *In* The impact of climate change on Ontario's forests. S.J. Colombo, L.J. Buse, M.L. Cherry, C. Graham, S. Greifenhagen, R.S. McAlpine, C.S. Papadapol, W.C. Parker, R. Scarr, M.L. Ter-

- Mikaelian, M.D. Flannigan, Ontario Forest Research Institute, Forest research paper no. 143. pp. 50.
- Colombo, S.J. (1998b) Climatic Warming and Its Effect on Bud Burst and Risk of Frost Damage to White Spruce in Canada. *Forestry Chronicle* 74: 567-577.
- Cooke, B.J. et Roland, J. (2000) Spatial analysis of large-scale patterns of forest tent caterpillar outbreaks. *Ecoscience* 7: 410-422.
- Cortinas, J.V. (1999) Climatology of freezing rain over the Great Lakes. *Climate Research* 3: 209-220.
- Courchesne, F., Roy, A.G., Biron, P.M., Cote, B., Fyles, J. et Hendershot, W.H. (2001) Fluctuations of climate conditions, elemental cycling and forest growth at the watershed scale. *Environmental monitoring and assessment* 67: 161-177 .
- Cox, R.M. et Malcom, J.W. (1997) Effects of winter thaw on birch die-back and xylem conductivity: An experimental approach with *Betula papyrifera* L. *Tree Physiology* 17: 389-396.
- Dale, H.D., Joyce, L.A., McNulty, S. et Neilson, R.P. (2000) The interplay between climate change, forests, and disturbances. *Science of the Total Environment* 262: 201-204.
- Dale, V.H., Joyce, L.A., McNulty, S., Neilson, R.P., Ayres, M.P., Flannigan, M.D., Hanson, P.J., Irland, L.C., Lugo, A.E., Peterson, C.J., Simberloff, D., Swanson, F.J., Stocks, B.J. et Wotton, B.M. (2001) Climate Change and Forest Disturbances. *Bioscience* 51: 723-734.
- Daniel, C.J. et Myers, J.H. (1995) Climate and outbreaks of the forest tent caterpillar. *Ecography* 18: 353-362.
- Davis, M. (1989) Lags in vegetation response to greenhouse warming. *Climatic Change* 15: 75-82.
- De Steven, D., Kline, J. et Matthiae, P.E. (1991) Long-term changes in a Wisconsin Fagus-Acer forest in relation to glaze storm disturbance. *Journal of Vegetation Science* 2: 201-208.
- Delcourt, H.R. et Delcourt, P.A. (1988) Quaternary landscape ecology: relevant scales in space and time. *Landscape Ecology* 2: 23-44.
- Deuber, C.G. (1941) The Glaze storm of 1940. *American Forest* 46: 210-211.
- Dickson, R.E., Coleman, M.D., Riemenschneider, D.E., Isebrands, J.G., Hogan, G.D. et Karnosky, D.F. (1998) Growth of Five Hybrid Poplar Genotypes Exposed to Interacting Elevated CO₂ and O₃. *Revue canadienne de recherche forestière* 28: 1706-1716.
- Downs, A.A. (1938) Glaze damage in the birch-beech-maple-hemlock type of Pennsylvania and New York. *Journal of forestry* 36: 63-70.
- Doyon F., S. Sougavinski (2002) Caractérisation du régime de perturbations naturelles de la forêt feuillue du nord-est de l'Amérique du Nord. Institut Québécois d'Aménagement de la Forêt Feuillue. 116 p.
- Drake, B.G. (1992) A field study of the effects of elevated CO₂ on ecosystem processes in a Chesapeake Bay wetland. *Aust. J. Bot* 40: 579-595.
- Drake, B.G., González, M.A. et Long, S.P. (1997) More efficient plant: A consequence of rising atmospheric CO₂ ? *Annual review of plant physiology and plant molecular biology* 48:

609-639.

- Ellis, W.N., J.H. Donner et J.H. Kuchlein. 1997. Recent shifts in phenology of Microlepidoptera, related to climatic change. *Entomologische Berichten* 57 (4): 66-72.
- Environment Canada (2002) Ice Storm 98. http://www.msc-smc.ec.gc.ca/media/icestorm98/index_e.cfm Dernière visite: 2002
- Flanagan, L.B., Ehleringer, J.R. et Marshall, J.D. (1992) Differential uptake of summer precipitation among co-occurring trees and shrubs in a pinyon-juniper woodland. *Plant, Cell and Environment* 15: 831-836.
- Flannigan, M., Campbell, I., Wotton, M., Carcaillet, C., Richard, P. et Bergeron, Y. (2001) Future Fire in Canada's Boreal Forest: Paleocology Results and General Circulation Model - Regional Climate Model Simulations. *Revue canadienne de recherche forestière* 31: 854-864.
- Flannigan, M. et van Wagner, C.E. (1991) Climate change and wildfire in Canada. *Revue canadienne de recherche forestière* 21: 66-72.
- Flannigan, M.D. (1998) Ontario's climate in the 21st century. *In* The impact of climate change on Ontario's forests. S.J. Colombo, L.J. Buse, M.L. Cherry, C. Graham, S. Greifenhagen, R.S. McAlpine, C.S. Papadapol, W.C. Parker, R. Scarr, M.L. Ter-Mikaelian, M.D. Flannigan, Ontario Forest Research Institute, Forest research paper no. 143. pp. 50.
- Flannigan, M.D., Bergeron, Y., Engelmark, O. et Wotton, B.M. (1998) Future wildfire in the northern forests : less than global warming would suggest. *Journal of Vegetation Science* 9: 469-476.
- Flannigan, M.D. et Harrington, J.B. (1983) A statistical study of the relation of components of the Fire Weather Index to monthly provincial area burned by wildfire in Canada, 1953-1980. *Can For. Serv., Petawawa Natl. For. Inst. Rep. PI-X-25.*
- Flannigan, M.D., Stocks, B.J. et Wotton, B.M. (2000) Climate Change and Forest Fires. *Science of the Total Environment* 262: 221-229.
- Flannigan, MD. et Woodward, F.I. (1994) Red Pine Abundance: Current Climatic Control and Responses to Future Warming. *Revue canadienne de recherche forestière* 24: 1166-1175.
- Fleming, R.A. (1996) A mechanism perspective of possible influences of climate change on defoliating insects in North America's boreal forests. *Silva Fennica* 30: 281-294.
- Fleming, R.A. (2000) Climate change and insect disturbance regimes in Canada's boreal forests. *World Resource Review* 12: 521-555.
- Fleming, R.A. et Candau, J.N. (1998) Influences of Climatic Change on Some Ecological Processes of an Insect Outbreak System in Canada's Boreal Forests and the Implications for Biodiversity. *Environmental Monitoring and Assessment* 49: 235-249.
- Fleming, R.A. et Volney, W.J.A. (1995) Effects of climate change on insect defoliator population processes in Canada's boreal forest: some plausible scenarios. *Water, air, and soil pollution* 82: 445-454.
- Foster, D.R. et Boose, E.R. (1992) Patterns of forest damage resulting from catastrophic wind in central New England. *Journal of Ecology* 80: 79-98.
- Francis, D. et Hengeveld, H. (1998) Extreme weather and climate change. Environment Canada,

- Ministry of Environment. Ottawa, Canada. 31p.
- Gielen, B. et Ceulemans, R. (2001) The Likely Impact of Rising Atmospheric CO₂ on Natural and Managed Populus: a Literature Review. *Environmental Pollution* 115: 335-358.
- Goebel, C.J. et Deitschman, G.H. (1967) Ice storm damage to planted conifers in Iowa. *Journal of forestry* 65: 496-497.
- Graumlich, L.J. (1993) Response of tree growth to climatic variation in the mixed conifer and deciduous forests of the upper Great Lakes region. *Revue canadienne de recherche forestière* 23: 133-143.
- Green, T.R. et Ryan, C.A. (1972) Wound-induced proteinase inhibitor in plant leaves : A possible defense mechanism against insects. *Science* 175: 776-777.
- Greene, D.F. et Johnson, E.A. (1995) Long-distance Wind Dispersal of Tree Seeds. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique* 73: 1036-1045.
- Greifenhagen, S. (1998) The impact of climate change on fungi in the forest ecosystem. *In* The impact of climate change on Ontario's forests. S.J. Colombo, L.J. Buse, M.L. Cherry, C. Graham, S. Greifenhagen, R.S. McAlpine, C.S. Papadapol, W.C. Parker, R. Scarr, M.L. Ter-Mikaelian, M.D. Flannigan, Ontario Forest Research Institute, Forest research paper no. 143. pp. 50.
- Groninger, J.W., Johnsen, K.H., Seiler, J.R., Will, R.E., Ellsworth, D.S. et Maier, C.A. (1999) Elevated Carbon Dioxide in the Atmosphere - What Might It Mean for Loblolly Pine Plantation Forestry? *Journal of Forestry* 97: 4-10.
- Hanson, P.J. et Weltzin, J.F. (2000) Drought Disturbance From Climate Change: Response of United States Forests. *Science of the Total Environment* 262: 205-220.
- Harrington, R., Fleming, R.A. et Woiwod, I.P. (2001) Climate change impacts on insect management and conservation in temperate regions: can they be predicted? *Agricultural and forest entomology* 3: 233-240.
- Harrington, R., I. Woiwod et T. Sparks. 1999. Climate change and trophic interactions. *Trends in Ecology and Evolution* 14 (4): 146-150.
- Hatcher, P.E. (1995) Three-way interactions between plant pathogenic fungi, herbivorous insects and their host plants. *Biol Rev Cambridge Phil Soc* 70: 639-694.
- Hattenschwiler, S. et C. Schafellner. 1999. Opposing effects of elevated CO₂ and N deposition on *Lymantria monacha* larvae feeding on spruce trees. *Oecologia* 118 (2): 210-217.
- Hauer, R.J., Wang, W. et Dawson, J.O. (1993) Ice storm damage to urban trees. *J. Arboriculture* 19: 187-193.
- Hearnden, K.W., Millison, S.V., et Wilson, W.C. (1992) A Report on the Status of Forest Regeneration. Ont. Independent For. Audit. Comm. Queen's Printer, Toronto.
- Hedden, R.L. (1988) Global climate change : implications for silviculture and pest management. Proc. Fifth Biennial Southern Silviculture Research Conference. USDA For. Serv., South. For. Exp. Sta., Memphis, Tennessee pp. 555-562. Gen. Tech. Rep. SO-74
- Hofgaard, A., Tardif, J. et Bergeron, Y. (1999) Dendroclimatic Response of *Picea Mariana* and *Pinus Banksiana* Along a Latitudinal Gradient in the Eastern Canadian Boreal Forest. *Revue canadienne de recherche forestière* 29: 1333-1346.

- Hooper, M.C., Arie, K. et Lechowicz, M.J. (2001) Impact of a Major Ice Storm on an Old-Growth Hardwood Forest. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique* 79: 70-75.
- Houston, D.R. (1998) Beech bark disease. *In* Exotic pests of eastern forests. Britton, K., editor, USDA Forest Service. pp. 29-41.
- Hulme, M. et Shread, N. (1999) Climate change scenarios for Canada. Climatic Research Unit. Norwich, UK. 6 pp.
- Hulme, M., Shread, N., et Markham, A. (1999) Global climate change scenarios. Climatic Research Unit. Norwich, UK. 2 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2001), Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (<http://www.ipcc.ch/>)
- Irland, L.C. (1998) Ice storm 1998 and the forests of the northeast. *Journal of Forestry* September: 32-40.
- Irland, L.C. (2000) Ice Storms and Forest Impacts. *Science of the Total Environment* 262: 231-242.
- Isebrands, J.G., McDonald, E.P., Kruger, E., Hendrey, G., Percy, K., Pregitzer, K., Sober, J. et Karnosky, D.F. (2001) Growth Responses of Populus Tremuloides Clones to Interacting Elevated Carbon Dioxide and Tropospheric Ozone. *Environmental Pollution* 115: 359-371.
- Iverson, L.R., Prasad, A. et Schwartz, M.W. (1999) Modeling Potential Future Individual Tree-Species Distributions in the Eastern United States Under a Climate Change Scenario: a Case Study With Pinus Virginiana. *Ecological Modelling* 115: 77-93.
- Iverson, L.R. et Prasad, A.M. (1998) Predicting Abundance of 80 Tree Species Following Climate Change in the Eastern United States. *Ecological Monographs* 68: 465-485.
- Iverson, L.R. et Prasad, A.M. (2001) Potential Changes in Tree Species Richness and Forest Community Types Following Climate Change. *Ecosystems* 4: 186-199.
- Iverson, L.R. et Prasad, A.M. (2002) Potential redistribution of tree species habitat under five climate change scenarios in the eastern US. *Forest Ecology and Management* 155: 205-222.
- Jacobson Jr., G.L. et Dieffenbacher-Krall, A. (1995) White pine and climate change: insights from the past. *Journal of Forestry* 93: 39-42.
- Jardon, Y. (2001). Analyses temporelles et spatiales des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec. Thèse de doctorat en sciences de l'environnement, UQAM. 157 pp.
- Jardon, Y., Filion, L. et Cloutier, C. (1994) Tree-ring evidence for endomycity of the larch sawfly in North America. *Revue canadienne de recherche forestière* 24: 742-747.
- Johnson, E.A., Miyanishi, K. et O'Brien, N. (1999) Long-Term Reconstruction of the Fire Season in the Mixedwood Boreal Forest of Western Canada. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique* 77: 1185-1188.
- Juillet, J.A. (1964) Influence of weather on flight activity of parasitic Hymenoptera. *Canadian*

- journal of zoology 42: 133-1141.
- Karnosky, D.F., Mankovska, B., Percy, K., Dickson, R.E., Podila, G.K., Sober, J., Noormets, A., Hendrey, G., Coleman, M.D., Kubiske, M., Pregitzer, K.S. et Isebrands, J.G. (1999) Effects of Tropospheric O₃ on Trembling Aspen and Interaction With CO₂: Results From an O₃-Gradient and a Face Experiment. *Water Air and Soil Pollution* 116: 311-322.
- Kerslake, J.E., S.J. Woodin et S.E. Hartley. 1998. Effects of carbon dioxide and nitrogen enrichment on plant-insect interaction: the quality of *Calluna vulgaris* as a host for *Operophtera brumata*. *New Phytologist* 140 (1): 43-53.
- Kimball, B.A. (1983) Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observations. *Agronomy journal* 75: 779-788.
- Kirilenko, A.P., Belotelov, N.V. et Bogatyrev, B.G. (2000) Global Model of Vegetation Migration: Incorporation of Climatic Variability. *Ecological Modelling* 132: 125-133.
- Kirschbaum, M.U.F. (1999a) CenW, a forest growth model with linked carbon, energy, nutrient and water cycles. *Ecological Modelling* 181: 17-59.
- Kirschbaum, M.U.F. (1999b) Modelling Forest Growth and Carbon Storage in Response to Increasing CO₂ and Temperature. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 51: 871-888.
- Kirschbaum, M.U.F. (2000) Forest Growth and Species Distribution in a Changing Climate. *Tree Physiology* 20: 309-322.
- Korner, C. (1993) CO₂ fertilization: the great uncertainty in future vegetation development. *In* *Vegetation-dynamics & global change*. A.M. Salomon, H.H. Shugart (eds), Chapman & Hall, New York. pp. 338.
- Kozar, F. et A.N. David. 1986. The unexpected northward migration of some species of insects in Central Europe. *Anzeiger fuer Schaedlingskunde Pflanzenschutz Umweltschutz*. 59 (5): 90-94.
- Kyto, M., Niemelä, P. et Annala, E. (1996) Vitality and bark beetle resistance of fertilized Norway spruce. *Forest Ecology and Management* 84: 149-157.
- LaFlamme, J.N. et Périard, G. (1996) The climate of freezing rain over the Province of Québec in Canada: a preliminary analysis. 7th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures / 7e Congrès international sur le givrage atmosphérique des structures. Université du Québec à Chicoutimi
- Lane, C.J., Reed, D.D., Mroz, G.D. et Liechty, H.O. (1993) Width of sugar maple (*Acer saccharum*) tree rings as affected by climate. *Revue canadienne de recherche forestière* 23: 2370-2375.
- Lavoie, C., S.A. Elias et L. Fillion. 1997. A 7000-year record of insect communities from a peatland environment, southern Quebec. *Ecoscience* 4 (3): 394-403.
- Lemon, P.C. (1961) Forest ecology of ice storms. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 88: 21-29.
- Lindroth, R.L. 1996. CO₂-mediated changes in tree chemistry and tree-lepidoptera interactions. Dans: *Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems* (Koch, G.W. et Mooney, H.A., eds), pp. 105-120, Academic Press.
- Lindroth, R.L., Kinney, K.K. et Platz, C.L. (1993) Responses of deciduous trees to elevated atmospheric CO₂: productivity, phytochemistry, and insect performance. *Ecology* 74: 763-

777.

- Liu, K. (1990) Holocene Paleoecology of the Boreal Forest and Great Lakes-St.Lawrence Forest in Northern Ontario. *Ecological Monographs* 60: 179-212.
- Lodge, D.J., McDowell, W.H. et McSwiney, C.P. (1994) The importance of nutrient pulses in tropical forests. *Trends Ecol. Evol.* 9: 384-387.
- Loehle, C. (1998) Height Growth Rate Tradeoffs Determine Northern and Southern Range Limits for Trees. *Journal of Biogeography* 25: 735-742.
- Loehle, C. (2000) Forest Ecotone Response to Climate Change: Sensitivity to Temperature Response Functional Forms. *Revue canadienne de recherche forestière* 30: 1632-1645.
- Loehle, C. et LeBlanc, D. (1996) Model-based Assessments of Climate Change on Forests: A Critical Review. *Ecological Modelling* 90: 1-31.
- Lortie, M. (1979) Arbres, forêts, et perturbations naturelles au Québec. Les Presses de l'Université Laval, Québec, Canada
- Luckman, B. et Kavanagh, T. (2000) Impact of Climate Fluctuations on Mountain Environments in the Canadian Rockies. *Ambio* 29: 371-380.
- Lucuik, G.S. (1984) Effect of climatic factors on post-diapause emergence and survival of spruce budworm (*Coristoneura fumiferana*) larvae (Lepidoptera: Tortricidae) . *The Canadian entomologist* 116: 1077-1084.
- Luxmoore, R.J., Wullschleger, S.D. et Hanson, P.J. (1993) Forest responses to CO₂ enrichment and climate warming. *Water Air Soil Pollut.* 70: 309-323.
- Lysyk, T.J. (1989) Stochastic model of eastern spruce budworm (Lepidoptera: Tortricidae) phenology on white spruce and balsam fir. *J. Econ. Entomol.* 82: 1161-1168.
- MacLean, S.F. (1983) Life cycle and the distribution of psyllids (Homoptera) in arctic and subarctic Alaska. *Oikos* 40: 445-451.
- Manion, P.D., Griffin, D.H. et Rubin, B.D. (2001) Ice damage impacts on the health of the northern New York State forest. *Forestry Chronicle* 77: 619-625.
- Marcais, B., Dupuis, F. et Desprez, L.M.L. (1996) Modelling the influence of winter frosts in the development of the stem canker of red oak caused by *Phytophthora cinnamomi*. *Annals of Forest Science* 53: 369-382.
- Martin, P. (1993) Vegetation Responses and Feedbacks to Climate: a Review of Models and Processes. *Clim. Dyn.* 8: 201-210.
- Martinat, P.J. (1988) The role of climatic variation and weather in forest insect outbreaks. *In* Insect outbreaks. Academic Press, Inc. pp. 241-267.
- Matson, P.A. et Waring, R.H. (1984) Effects of nutrients and light limitation on mountain hemlock: susceptibility to maintained root rot. *Ecology* 65: 1517-1524.
- Mattson, W.J. et Haack, R.A. (1987) The role of drought in outbreaks of plant-eating insects. *Bioscience* 37: 110-118.
- McAlpine, R.S. (1998) The impact of climate change on forest fires and forest fire management in Ontario. *In* The impact of climate change on Ontario's forests. S.J. Colombo, L.J. Buse, M.L. Cherry, C. Graham, S. Greifenhagen, R.S. McAlpine, C.S. Papadapol, W.C. Parker,

- R. Scarr, M.L. Ter-Mikaelian, M.D. Flannigan, Ontario Forest Research Institute, Forest research paper no. 143. pp. 50.
- Mckenney-Easterling, M., Dewalle, D.R., Iverson, L.R., Prasad, A.M. et Buda, A.R. (2000) The Potential Impacts of Climate Change and Variability on Forests and Forestry in the Mid-Atlantic Region. *Climate Research* 14: 195-206.
- McLaughlin, S. et Percy, K. (1999) Forest health in North America: some perspectives on actual and potential roles of climate and air pollution. *Water, air, and soil pollution* 116: 151-197.
- Melancon, S. et Lechowicz, M.J. (1987) Differences in the damage caused by glaze ice on codominant *Acer saccharum* and *Fagus grandifolia*. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique* 65: 1157-1159.
- Melillo, J.M. (1999) Warm, warm on the range. *Science* 283: 183-184.
- Melillo, J.M., Callaghan, T.V., Woodward, F.I., Salati, E., et Sinha, S.K. (1990) Effects on Ecosystems. *In* *Climate change: the IPCC scientific assessment*. Cambridge University Press, Cambridge (UK). pp. 283-310.
- Menges, E.S. et Loucks, O.L. (1984) Modeling a disease-caused patch disturbance: oak wilt in the midwestern United States. *Ecology* 65: 487-498.
- Milton, J. et Bourque, A. (1999) A climatological account of the January 1998 Ice storm in Quebec. *A climatological account of the January 1998 Ice storm in Quebec*. 87p.
- Mott, K.A. (1990) Sensing of atmospheric CO₂ by plants. *Plant, Cell and Environment* 13: 731-737.
- Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G. et Nemani, R.R. (1997) Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. *Nature* 386: 698-702.
- Natural Resources Canada (2002) *Climate Change Impacts and Adaptation: A Canadian Perspective - Forestry*. Natural Resources Canada. Ottawa.
- Niemela, P. F.S. Chapin III, K. Danell et J.P. Bryant. 2001. Herbivory-mediated responses of selected boreal forests to climatic change. *Climatic Change* 48 (2-3): 427-440.
- Nykanen, M.L., Peltola, H., Quine, C., Kellomaki, S. et Broadgate, M. (1997) Factors affecting snow damage of trees in particular reference to European conditions. *Silva Fennica* 31: 193-213.
- O'Hare, G. Global warming and extreme weather: a cautionary note. *Geography* 84: 87-91.
- O'Neill, E.G. (1994) Responses of soil biota to elevated atmospheric carbon dioxide. *Plant and soil* 65: 55-65.
- Olszyk, D., Wise, C., Vaness, E., Apple, M. et Tingey, D. (1998a) Phenology and Growth of Shoots, Needles, and Buds of Douglas- Fir Seedlings With Elevated CO₂ and (or) Temperature. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique* 76: 1991-2001.
- Olszyk, D., Wise, C., Vaness, E. et Tingey, D. (1998b) Elevated Temperature but Not Elevated CO₂ Affects Long-Term Patterns of Stem Diameter and Height of Douglas-Fir Seedlings. *Revue canadienne de recherche forestière* 28: 1046-1054.

- Overpeck, J.T., Bartlein, P.J. et Webb, T.I. (1991) Potential magnitude of future vegetation change in eastern North America: comparisons with the past. *Science* 254: 692-695.
- Overpeck, J.T., Rind, D. et Goldberg, R. (1990) Climate-induced changes in forest disturbance and vegetation. *Nature* 343 (6253): 51-53.
- Paine, T.D., Rafea, K.F. et Harrington, T.C. (1997) Interactions among scolytid bark beetles, their associated fungi, and live host conifers. *Annu Rev Entomol* 42: 179-206.
- Papadopol, C.S. (2000) Impacts of Climate Warming on Forests in Ontario: Options for Adaptation and Mitigation. *Forestry Chronicle* 76: 139-149.
- Parker, W.C., Colombo, S.J., Cherry, M., Flannigan, M.D., Greifenhagen, S., McAlpine, R.S., Papadopol, C.S. et Scarr, T. (2000) Third Millennium Forestry: What climate change might mean to forests and forest management in Ontario. *Forestry Chronicle* 76: 445-463.
- Pearce, F. (1995) Fiddling while Earth warms. *New science* 145: 14-15.
- Pearce R.B. (1996) Antimicrobial defences in the wood of living trees. *New Phytologist* 132: 203-233.
- Penuelas, J. et M. Estiarte. 1998. Can elevated CO₂ affect secondary metabolism and ecosystem function? *Trends in Ecology and Evolution* 13 (1): 20-24.
- Percy, K.E., Awmack, C.S., Lindroth, R.L., Kopper, B.J., Isebrands, J.G., Pregitzer, K.S., Hendry, G.R., Dickson, R.E., Zak, D.R., Oksanen, E., Sober, J., Harrington, R. et Karnosky, D.F. (2002) Will pests modify predicted response of forests to CO₂ enriched atmospheres? *Nature* 420: 403-407.
- Petchey, O.L., P.T. McPhearson, T.M. Casey et P.J. Morin. 1999. Environmental warming alters food-web structure and ecosystem function. *Nature* 402 (6757): 69-72.
- Peters, R.L. (1990) Effects of Global Warming on Forests. *Forest Ecology and Management* 35 : 13-33.
- Peters, R.L. et Lovejoy, T.E. (1992) *Global Warming and Biological Diversity*. Yale University Press, New Haven, CT.
- Peterson, C.J. (2000) Catastrophic Wind Damage to North American Forests and the Potential Impact of Climate Change. *Science of the Total Environment* 262: 287-311.
- Peterson, C.J. et Pickett, S.T.A. (1991) Treefall and resprouting after windthrow. *Forest Ecology and Management* 42: 205-217.
- Pickett, S.T.A. et White, P.S. (1985) Patch dynamics: a synthesis. *In* *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. Academic Press, New York. pp. 371-384.
- Podur, J., Martell, D.L. et Knight, K. (2002) Statistical Quality Control Analysis of Forest Fire Activity in Canada. *Revue canadienne de recherche forestière* 32: 195-205.
- Price, C. et Rind, D. (1994) Possible implications of global climate change on global lightning distributions and frequencies. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 99: 10823.
- Proulx, O.J. et Greene, D.F. (2001) The Relationship Between Ice Thickness and Northern Hardwood Tree Damage During Ice Storms. *Revue canadienne de recherche forestière* 31: 1758-1767.
- Quamme, H.A. (1987) Low temperature stress in Canadian Horticultural production - An

- overview. *Canadian Journal of Plant Science* 97: 608-613.
- Rebertus, A.J., Shifley, S.R., Richards, R.H. et Roovers, L.M. (1997) Ice storm damage to an old-growth oakhickory forest in Missouri. *American Midland Naturalist* 137: 48-61.
- Reed, D.D., Jones, E.A., Liechty, H.O., Mroz, G.D. et Jurgensen, M.F. (1992) Impacts of annual weather conditions on forest productivity: a case study involving four North American deciduous tree species. *International journal of biometeorology* 36: 51-57.
- Régnière, J. et You, M. (1991) A simulation model of spruce budworm (Lepidoptera: Tortricidae) feeding on balsam fir and white spruce. *Ecological Modelling* 54: 277-297.
- Rehfeldt, G.E., Ying, C.C., Spittlehouse, D.L. et Hamilton, D.A. (1999) Genetic Responses to Climate in *Pinus Contorta*: Niche Breadth, Climate Change, and Reforestation. *Ecological Monographs* 69: 375-407.
- Richer, C., Rioux, J.A., Lamy, M.P. et Daigle, G. (2001) Winter damage on young plants of *Acer saccharinum* L. under different Canadian climatic conditions. *Canadian Journal of Plant Science* 81: 145-153.
- Rizzo, B. et Wilken, E. (1992) Assessing the sensitivity of Canada's forests to climatic change. *Climatic Change* 21: 37-55.
- Roland, J. (1993) Large-scale forest fragmentation increases the duration of tent caterpillar outbreaks. *Oecologia* 93: 25-30.
- Rose, A.H. et Lindquist, O.H. (1997) Insectes des feuillus de l'est du Canada. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts. Ottawa. Rep. Rapport technique de foresterie 29F. Édition révisée. 304 p.
- Rowe, J.S. (1972) The Forest Regions of Canada. Canadian Forest Service. Ottawa. Rep. No. 1300.
- Rubin, B.D. et Manion, P.D. (2001) Landscape-Scale Forest Structure in Northern New York and Potential Successional Impacts of the 1998 Ice Storm. *Forestry Chronicle* 77: 613-618.
- Ruel, J.C. (1995) Understanding windthrow: silvicultural implications. *Forestry Chronicle* 71: 434-445.
- Sager, R. et Ryan, F.J. (1961) Cell heredity. John Wiley and Sons Inc., New York. 411p.
- Sandberg, D.V. (1992) Adaptive response to forest disturbance in a changing climate - fire, insects, and disease. Proc. North American Conference on Forestry Responses to Climate Change. Climate Institute. Washington, D.C. pp. 294-305
- Sanders, C.J., Wallace, D.R. et Lucuik, G.S. (1978) Flight activity of female eastern spruce budworm (Lepidoptera: Tortricidae) at constant temperatures in the laboratory. *The Canadian entomologist* 107: 1289-1299.
- Scarr, T. (1998) Insects and climate. *In* The impact of climate change on Ontario's forests. S.J. Colombo, L.J. Buse, M.L. Cherry, C. Graham, S. Greifenhagen, R.S. McAlpine, C.S. Papadapol, W.C. Parker, R. Scarr, M.L. Ter-Mikaelian, M.D. Flannigan, Ontario Forest Research Institute, Forest research paper no. 143. pp. 50.
- Schenk, H.J. (1996) Modeling the Effects of Temperature on Growth and Persistence of Tree Species: A Critical Review of Tree Population Models. *Ecological Modelling* 92: 1-32.

- Schimel, D. et Baker, D. (2002) The wildfire factor. *Nature* 420: 29-30.
- Schimmel, D.S. (1995) Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global change biology* 1: 77-91.
- Schwartz, M.W., Iverson, L.R. et Prasad, A.M. (2001) Predicting the Potential Future Distribution of Four Tree Species in Ohio Using Current Habitat Availability and Climatic Forcing. *Ecosystems* 4: 568-581.
- Schwert, D.P., T.W. Anderson, A. Morgan, A.V. Morgan et P.F. Karrow. 1985. Change in late quaternary vegetation and insect communities in southwestern Ontario, Canada. *Quaternary Research* 23 (2): 205-226.
- Seischab, F.K., Bernard, J.M. et Eberle, M.D. (1993) Glaze storm damage to western New York forest communities. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 120: 64-72.
- Simberloff, D. (2000) Global Climate Change and Introduced Species in United States Forests. *Science of the Total Environment* 262: 253-261.
- Sisinni, S.M., Zipperer, W.C. et Pleninger, A.C. (1995) Impacts from a major ice storm: street-tree damage in Rochester, New York. *J. Arboriculture* 21: 156-167.
- Société de protection contre les insectes et maladies (SOPFIM) (2002) La tordeuse des bourgeons de l'épinette. <http://www.sopfim.qc.ca/fr/index.html> Dernière visite: 2002
- Solomon, A.M. (1986) Transient response of forests to CO₂-induced climate change: simulation modeling experiments in eastern North America. *Oecologia* 68: 567-579.
- Stedinger, J.R. (1984) A spruce-budworm-forest model and its implications for suppression programs. *Forest Science* 30: 597-615.
- Stiling, P., A.M. Rossi, B. Hungate, P. Dijkstra, C.R. Hinkle, W.M. Knott III et B. Drake. 1999. Decreased leaf-miner abundance in elevated CO₂: Reduced leaf quality and increased parasitoid attack. *Ecological Applications* 9 (1): 240-244.
- 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. et Mckenney, D.W. (1998) Climate Change and Forest Fire Potential in Russian and Canadian Boreal Forests. *Climatic Change* 38: 1-13.
- Thomas, C.D., E.J. Bodsworth, R.J. Wilson, A.D. Simmons, Z.G. Davies, M. Musche et L. Conradt. 2001. Ecological and evolutionary processes at expanding range margins. *Nature* 411 (6837): 577-581.
- Thompson, I.D., Flannigan, M.D., Wotton, B.M. et Suffling, R. (1998) The Effects of Climate Change on Landscape Diversity: an Example in Ontario Forests. *Environmental Monitoring and Assessment* 49: 213-233.
- Tissue, D.T., Thomas, R.B. et Strain, B.R. (1996) Growth and photosynthesis of loblolly pine (*Pinus taeda*) after exposure to elevated CO₂ for 19 months in the field. *Tree Physiology* 16: 49-59.
- Turchin, P. et Taylor, A.D. (1992) Complex dynamics in ecological times series. *Ecology* 73: 289-305.
- Van der Kamp, B.J. (1991) Pathogens as agents of diversity in forested landscapes. *Forestry Chronicle* 67: 353-354.

- Van Dyke, O. (1999) A literature review of ice storm impacts on forests in Eastern North America. Ontario Ministry of Natural Resources, Southcentral Sciences Section. Rep. Technical Report #112.
- Van Wagner, C.E. (1987) Development and structure of the Canadian forest weather index. Canadian Forest Service. Ottawa. Rep. For. Tech. Rep. 35.
- Veblen, T.T., Kulakowski, D., Eisenhart, K.S. et Baker, W.L. (2001) Subalpine Forest Damage From a Severe Windstorm in Northern Colorado. *Revue canadienne de recherche forestière* 31: 2089-2097.
- Virtanen, T., Neuvonen, S. et Nikula, A. (1998) Modelling topoclimatic patterns of egg mortality of *Epirrita autumnata* (Lep: Geometridae) with geographical information system: predictions in current climate and scenarios with warmer climate. *Journal of applied ecology* 35: 311-322.
- Visser, M.E. et L.J.M. Holleman. 2001. Warmer springs disrupt the synchrony of oak and winter moth phenology. *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences Series B*, 268 (1464): 289-294.
- Visser, M.E., A.J. Van Noordwijk, J.M. Tinbergen et C.M. Lessells. 1998. Warmer springs lead to mistimed reproduction in great tits (*Parus major*). *Proc. R. Soc. London Ser. B* 265: 1867–1870.
- Vitousek, P.M., D'Antonio, C.M., Loope, L.L. et Westbrooks, R. (1996) Biological invasions as global environmental change. *Am. Sci.* 84: 468-478.
- Volin, J.C., Kruger, E.L. et Lindroth, R.L. (2002) Responses of Deciduous Broadleaf Trees to Defoliation in a CO₂ Enriched Atmosphere. *Tree Physiology* 22: 435-448.
- Volney, W.J.A. et Fleming, R.A. (2000) Climate Change and Impacts of Boreal Forest Insects. *Agriculture Ecosystems & Environment* 82: 283-294.
- Weber, M.G. et Flannigan, M.D. (1997) Canadian boreal forest ecosystem structure and function in a changing climate: impact on fire regimes. *Environmental reviews* 5: 145-166.
- Weber, M.G. et Stocks, B.J. (1998) Forest Fires and Sustainability in the Boreal Forests of Canada. *Ambio* 27: 545-550.
- Wellington, W.G. (1948) The light reactions of the spruce budworm, *Choristoneura fumiferana* Clemens (Lepidoptera: Tortricidae). *The Canadian entomologist* 80: 56-82.
- Whitney, C.G. (1986) Relation of Michigan's Pre-settlement Pine Forests to Substrate and Disturbance History. *Ecology* 67: 1548-1559.
- Wilf, P. et C.C. Labandeira. 1999. Response of plant-insect associations to Paleocene-Eocene warming. *Science* 284 (5423): 2153-2156.
- Wilf, P., C. C. Labandeira, K.R. Johnson, R. Kirk, P.D. Coley et A.D. Cutter. 2001. Insect herbivory, plant defense, and early Cenozoic climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 98 (11): 6221-6226.
- Williams, D.W. (1995) Forest defoliators and climatic change: potential changes in spatial distribution of outbreaks of western spruce budworm (Lepidoptera: Tortricidae) and gypsy moth (Lepidoptera: Lymantriidae). *Environmental entomology* 24: 1-9.

- Woodward, F.I. (1987) *Climate and Plant Distribution*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Wotton, B.M. et Flannigan, M.D. (1993) Length of the fire season in a changing climate. *The Forestry chronicle* 69: 187-192.
- Zerr, R.J. (1997) Freezing rain: An observational and theoretical study. *J. Appl. Meteorol* 36: 1647-1661.
- Zhu, X.B., Cox, R.M., Bourque, C.P.A. et Arp, P.A. (2002) Thaw Effects on Cold-Hardiness Parameters in Yellow Birch. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique* 80: 390-398.