



Perturbations naturelles dans les forêts du centre du Canada : Interactions entre la tordeuse des bourgeons de l'épinette et les feux incontrôlés dans le contexte des changements climatiques



Service canadien des forêts
Centre de foresterie des Grands Lacs

Rapport d'information
GLC-X-31

Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ontario)

Le Centre de foresterie des Grands Lacs (CFGL) est l'un des cinq centres de recherche faisant partie du Service canadien des forêts (SCF), qui est la voix nationale et internationale du secteur forestier du Canada. Un des principaux mandats du SCF consiste à effectuer des recherches scientifiques sur les forêts du Canada. Ces recherches peuvent servir à orienter la planification de l'aménagement forestier et les décisions stratégiques, et à aider l'industrie forestière, le public et d'autres scientifiques. Les projets de recherche couvrent diverses problématiques liées à la foresterie, notamment les changements climatiques, les incendies de forêt, les ravageurs forestiers et la télédétection. Les résultats de ces travaux de recherche sont divulgués sous la forme de rapports scientifiques et techniques et d'autres publications.

Des renseignements supplémentaires sur les travaux de recherche et publications de Ressources naturelles Canada, du Service canadien des forêts, et du Centre de foresterie des Grands Lacs, sont disponibles à la page <https://www.rncan.gc.ca/science-et-donnees/centres-de-recherche-et-laboratoires/centre-recherche-forets/centre-foresterie-grands-lacs/13460>.

Pour télécharger cette publication, consultez notre bibliothèque en ligne : <https://scf.rncan.gc.ca/publications>.



Natural Resources
Canada

Ressources naturelles
Canada

Perturbations naturelles dans les forêts du centre du Canada : Interactions entre la tordeuse des bourgeons de l'épinette et les feux incontrôlés dans le contexte des changements climatiques.

Fewster, V.; MacQuarrie, C.J.K. et Candau, J.-N.

Centre de foresterie des Grands Lacs, Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada, 1219 rue Queen Est., Sault Ste. Marie (Ontario) P6A 2E5

Bibliothèque et Archives Canada offre des renseignements sur le catalogage de cette publication.

Perturbations naturelles dans les forêts du centre du Canada : Interactions entre la tordeuse des bourgeons de l'épinette et les feux incontrôlés dans le contexte des changements climatiques (Rapport d'information, GLC-X-31F).

Publié aussi en anglais sous le titre : « Natural Disturbance in Central Canada's Forests: Spruce Budworm – Wildfire Interactions in a Changing Climate »

Fewster, V.; MacQuarrie, C.J.K. et Candau, J.-N.

Monographie électronique en format PDF.

Comprend des références bibliographiques.

ISBN : 978-0-660-42024-0 ISSN 2562-0746

No de catal. : Fo123-2/31-2022F-PDF

Le contenu de cette publication ou de ce produit peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et le nom de l'organisation qui en est l'auteur; et
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par Ressources naturelles Canada (RNCAN) et que la reproduction n'a pas été faite en association avec RNCAN ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales sont interdites, sauf avec la permission écrite de RNCAN. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec RNCAN à droitdauteur.copyright@rncan-nrcan.gc.ca.

©Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de Ressources naturelles Canada, 2022.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction.....	1
Défoliation causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette	2
Feux incontrôlés	2
Interactions entre la tordeuse des bourgeons de l'épinette et les feux incontrôlés.....	2
Contribution des changements climatiques	3
Conclusion	4
Références.....	5

INTRODUCTION

Au Canada, 75 % des terres classées « forestières » se trouvent dans la région boréale. La forêt boréale assure de ce fait d'importants services écosystémiques, comme la séquestration de carbone, la purification de l'air et de l'eau et la régulation du climat. La dynamique des écosystèmes de la forêt boréale est fortement affectée par les régimes de perturbations naturelles, en particulier les feux de forêt et les épidémies d'insectes ou de maladies. Historiquement, ces perturbations ont aidé la forêt à croître et à se régénérer naturellement en augmentant l'exposition du sous-bois à la lumière du soleil, en libérant des éléments nutritifs et en permettant aux graines de germer. Selon les modèles de changement climatique, le biome boréal devrait connaître la plus forte augmentation de température de tous les types de forêts et subir une hausse de perturbations biotiques et non biotiques (Gauthier et coll., 2015; Fleming et Candau 1998).

La tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE), aussi connue sous le nom scientifique de *Choristoneura fumiferana* (Clem.), est un insecte défoliateur qui se nourrit principalement du sapin baumier (*Abies balsamea*) et de l'épinette blanche (*Picea glauca*), mais également de l'épinette noire (*Picea mariana*) et d'autres conifères durant les épidémies. Il s'agit de l'un des défoliateurs forestiers indigènes les plus nuisibles en Amérique du Nord. Les épidémies se produisent à des intervalles irréguliers de 30 à 40 ans en moyenne et la défoliation peut demeurer élevée pendant au moins 10 ans. On prévoit que les changements climatiques affecteront la fréquence des épidémies (Candau et Fleming, 1998; Candau et Fleming, 2011), l'aire de défoliation (Candau et Fleming, 2011) et la synchronisation de la période printanière d'émergence des insectes avec la période de vulnérabilité des arbres (Pureswaran et coll., 2018). Ces effets pourraient modifier radicalement les processus naturels, la vitalité et la composition des espèces constituant la forêt boréale.

Au cours des dernières années, certains grands incendies (> 2 km²) ont dévasté des communautés et des écosystèmes entiers (p. ex., Fort McMurray en 2016, la Californie en 2017 et 2018 et l'Australie en 2019-2020). Au Canada, les grands incendies se produisent le plus souvent dans les forêts de conifères, le Bouclier boréal affichant le deuxième plus haut taux de vulnérabilité et de superficie relative brûlée derrière la Taïga des plaines (Gralewicz et coll., 2012). Les situations météorologiques extrêmes et les hausses de température devraient contribuer à hausser la fréquence d'allumage (Girardin et Mudelsee 2008; Wotton et coll., 2010; Lui et coll., 2014; Boulanger et coll., 2018), à augmenter le nombre de jours qui offrent des conditions propices à la propagation des feux (Wang et coll., 2015, 2017), à prolonger la saison des feux (Hanes et coll., 2019; Jain et coll., 2017) et à les amplifier (Wotton et coll., 2017; Wang et coll., 2020).

DÉFOLIATION CAUSÉE PAR LA TORDEUSE DES BOURGEONS DE L'ÉPINETTE

Avec l'appui de la province de l'Ontario, le Relevé des insectes et des maladies des arbres (RIMA) du Service canadien des forêts a cartographié toutes les zones de défoliation à grande échelle observées en Ontario de 1941 à 2008, période à laquelle la province a assumé l'entière responsabilité de la collecte des données. Ces cartes ont depuis été numérisées et utilisées dans le cadre de nombreuses études sur la TBE. L'analyse de ces données par Candau et coll., (1998) montre clairement l'existence d'un schéma spatio-temporel de défoliation fréquente dans trois zones géographiques distinctes, appelées « points chauds », séparées par deux couloirs d'environ 100 km de largeur où la défoliation a été relativement peu fréquente. Les points chauds et les couloirs forment ensemble une zone appelée ceinture de défoliation (figure 1). Les limites septentrionales de la ceinture sont probablement imputables à l'absence des espèces hôtes de prédilection (p. ex., le sapin baumier et l'épinette blanche) et à des conditions climatiques moins favorables. La limite méridionale de la ceinture se trouve là où la forêt devient principalement constituée de feuillus avec seulement quelques petites poches d'hôtes de la TBE.

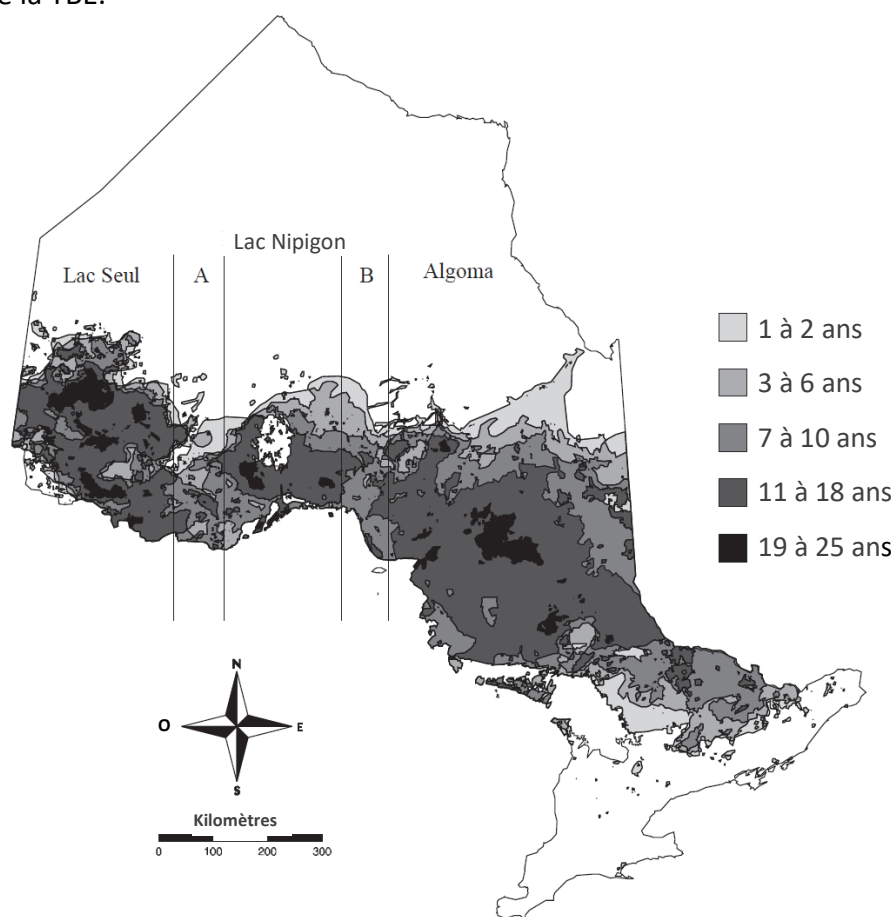


Figure 1. Carte de la défoliation attribuable à la tordeuse des bourgeons de l'épinette en Ontario illustrant la ceinture de défoliation formée par les trois points chauds séparés par deux couloirs de 100 km de large. La légende indique le nombre d'années de défoliation enregistrées pour chaque zone entre 1941 et 1996 (Candau et coll., 1998).

En affinant leur analyse initiale, Candau et Fleming (2005) ont cerné les importantes conditions bioclimatiques qui affectent la distribution spatiale de la défoliation attribuable à la TBE, y compris les températures hivernales maximales et minimales, la présence du sapin baumier et de l'épinette blanche et la température printanière minimale. Les fréquences de défoliation faibles à la limite nord de la ceinture correspondent aux températures hivernales basses, qui peuvent causer la mortalité des larves du deuxième stade durant les périodes extrêmement froides (Candau et Fleming, 2005). On a également tendance à observer des fréquences faibles de défoliation lorsque la température maximale du mois de mai est élevée ($> 17,9$ °C). À l'inverse, on observe une fréquence de défoliation élevée lorsque les températures printanières moyennes sont fraîches ($< -2,7$ °C) et que les étés ou le mois de juin sont secs (p. ex., < 86 mm de précipitations en été). Pour que la TBE puisse se nourrir, il est important que le débourrement et l'émergence des larves soient synchrones : si le débourrement ou l'émergence des larves se produit trop tôt ou trop tard, les larves ne disposeront pas d'une source de nourriture ou de conditions propices au déclenchement d'une épidémie. Sur le plan phénologique, le débourrement du sapin baumier et de l'épinette noire a tendance à s'accélérer avec l'augmentation des températures, tandis que les larves ont tendance à émerger lorsque les températures moyennes de l'air atteignent 10 °C (Pureswaran et coll., 2019).

FEUX INCONTRÔLÉS

Au Canada, les feux incontrôlés font l'objet d'un suivi grâce à une base de données nationale¹ qui compile les données des provinces, des territoires, des organismes de protection contre les incendies et des parcs sur ces feux. Ces données montrent qu'au cours des 40 dernières années, les grands incendies (>2 km²) ont le plus souvent eu lieu de 100 à 300 km des lieux peuplés et des réseaux de transport; plus rarement à moins de 100 km de la population et des infrastructures en raison de l'accroissement des efforts de lutte contre les incendies (Gralewicz et coll., 2012). La base de données sur les feux incontrôlés montre également qu'au fil du temps, les régimes de feux ont changé. On observe une augmentation des incendies causés par la foudre et une diminution des incendies causés par l'homme, les saisons de feux se sont prolongées et les grands incendies ont pris de l'ampleur (Hanes et coll., 2019). Ces changements de régime peuvent être attribuables à un changement de climat, à des facteurs biotiques et non biotiques, à une combinaison de ces facteurs ou à des améliorations dans la détection et le signalement, le suivi et le diagnostic de la cause des incendies.

INTERACTIONS ENTRE LA TORDEUSE DES BOURGEONS DE L'ÉPINETTE ET LES FEUX INCONTRÔLÉS

Les interactions potentielles entre la TBE et les feux incontrôlés ont longtemps été déduites de l'observation fréquente de grands incendies qui avaient lieu peu après une période de défoliation grave ayant duré plusieurs années. Le processus consistait en l'accumulation de ce qu'on a appelé le « combustible étagé », c'est-à-dire des cimes brisées d'arbres morts et d'autres composants d'arbres morts après plusieurs années de défoliation grave. Or, ce type particulier de combustible accroît considérablement la connectivité entre la couverture morte et la canopée, ce qui permet aux feux de

¹ La Base nationale de données sur les feux de forêt du Canada peut être consultée à l'adresse <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/ah/nfdb>

surface d'atteindre la canopée plus facilement et plus rapidement. La défoliation attribuable à la TBE et l'avènement de feux incontrôlés dans le centre du Canada sont liés. Les travaux de Fleming et coll., (2002) ont révélé que, dans la ceinture de défoliation (figure 1), les zones affichant une fréquence modérée de défoliation (9 à 11 ans) étaient plus susceptibles de brûler, tandis que les zones affichant une fréquence élevée et faible subissaient rarement des incendies. On pense que cela est probablement dû au fait que les zones de défoliation à fréquence élevée n'ont peut-être pas assez de carburant à brûler et que celles à fréquence faible ne sont peut-être pas en mesure d'alimenter les grands incendies en raison d'un manque de combustible étagé. Il faut au moins 20 ans pour qu'une zone se rétablisse d'un grand incendie et se régénère selon la composition d'espèces nécessaire pour soutenir une population de TBE. Dans les zones défoliées, les incendies sont le plus souvent survenus de façon disproportionnée de 3 à 9 ans après une épidémie de TBE. Des travaux récents ont montré que la période d'interaction de la TBE avec le feu varie d'est en ouest (figure 2; Candau et coll., 2018). On pense que la composition de la forêt et le climat ont une incidence sur cette période en fonction des taux de décomposition des combustibles de surface et étagés, ainsi que d'autres variables importantes comme la concentration en bois de feuillus, l'humidité climatique, la prévalence des espèces hôtes (sapin baumier, épinette blanche et épinette noire), la durée de la période de défoliation et la prévalence des espèces hôtes primaires (sapin baumier et épinette blanche). Peu de signes d'interactions existent entre la TBE et le feu ayant donné lieu à de grands incendies dans le sud-est (forte concentration en bois de feuillus et rareté de la défoliation), le nord-est (peu ou pas d'antécédents de défoliation), l'ouest et le sud-ouest (climat très sec) de la ceinture. Ces variables définissent les limites des interactions probables entre le feu et la défoliation attribuable à la TBE.

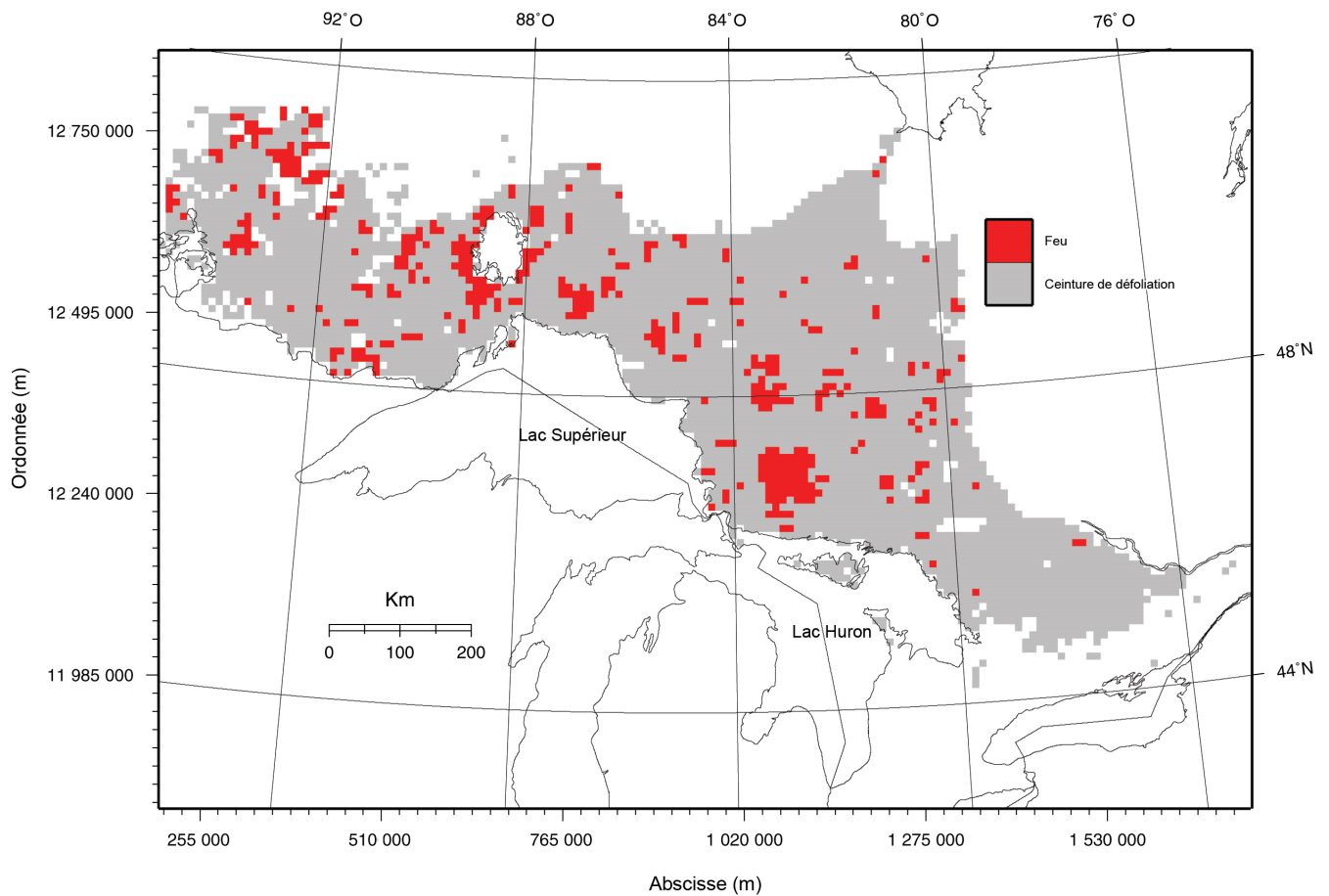


Figure 2. Zones d'interactions probables de la défoliation de la tordeuse des bourgeons de l'épinette et les grands (>2 km²) incendies (rouges) qui en résultent le long de la ceinture de défoliation (grise) (Candau et coll., 2018).

CONTRIBUTION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Il est probable que les changements climatiques influenceront les principaux facteurs biotiques et non biotiques qui ont une incidence sur la TBE, les feux incontrôlés et leurs interactions. Le biome boréal devrait connaître la plus forte augmentation de température de tous les types de forêts et une hausse probable des perturbations biotiques et non biotiques (Gauthier et coll., 2015). À l'aide de six scénarios de changements climatiques allant de 2011 à 2040, les travaux de Candau et Fleming (2011) ont montré une hausse des principales variables de la défoliation attribuable à la TBE, soit la température hivernale maximale et la température minimale du mois de mai, alors que la variation des précipitations serait généralement faible. Bien qu'ils prédisent une baisse de la fréquence de défoliation, ces scénarios prédisent également que la limite de défoliation se déplacera vers le nord, ce qui fera augmenter la défoliation totale de près de 3 % sur la période allant de 2011 à 2040. Toutefois, en tenant compte de la dynamique de la végétation, on s'attend à ce que le sapin baumier et l'épinette blanche se déplacent vers le nord et soient remplacés dans le sud par des forêts de feuillus, des prairies ou des zones arbustives. Ces changements peuvent ne pas survenir pendant la période étudiée (2011-2040), mais peuvent se produire sur une plus longue période. Les changements climatiques devraient avoir des effets négatifs sur la biomasse des conifères, tels que réduire de près de 83 % le nombre de sapins baumiers et de plus de 92 % le nombre d'épinettes noires (Tremblay et coll., 2018). De plus, la tendance au réchauffement planétaire risque de perturber la synchronie phénologique de la TBE avec ses hôtes (Pureswaran et coll., 2019) : la TBE pourrait émerger de la diapause ou éclore avant le débourrement ou la fenêtre de défoliation de l'épinette noire par cet insecte peut s'élargir pendant un cycle épidémique après la défoliation du sapin baumier (Pureswaran et coll., 2019).

La plupart des changements qui seront observés dans les forêts boréales devraient résulter de changements dans le régime de feu (Tremblay et coll., 2018). On s'attend à ce que les incendies prennent de l'ampleur avec la hausse des feux de cime dans le contexte des changements climatiques (Wotten et coll., 2017) et avec l'augmentation de 35 % à 400 % d'ici 2050 (Wang et coll., 2015) du nombre de jours propices à la propagation (c.-à-d. les quelques jours aux conditions météorologiques intenses ou extrêmes propices aux incendies durant lesquels la majeure partie de la zone est brûlée). On devrait observer les plus importantes hausses des taux de combustion (c.-à-d. le pourcentage de la superficie brûlée annuellement) dans le nord de l'Ontario, le nord du Québec et le centre du Canada (Boulanger et coll., 2018). Avec l'augmentation des feux incontrôlés, les particules de fumée empêcheront le soleil de rayonner sur le sol puis d'interagir avec les nuages, ce qui se traduira par des températures de surface plus froides et des précipitations plus faibles. Toutefois, l'augmentation des émissions de CO₂ entraînera toujours l'augmentation des températures à long terme (Liu et coll., 2014).

Les tendances à long terme montrent que les précipitations et les températures vont augmenter dans la forêt boréale. Toutefois, la hausse des températures annulera tout effet d'augmentation des précipitations, ce qui entraînera des sécheresses plus fréquentes (Wang et coll., 2014). Étant donné que la teneur en humidité des couches profondes et supérieures du sol affecte respectivement la taille et la fréquence des incendies (Portier et coll., 2019), les variations de température et de

précipitations sont susceptibles d'avoir une incidence sur ces couches, ce qui entraînera l'apparition de conditions plus sèches et plus inflammables. Les changements correspondants dans le régime de feu et la défoliation pourraient venir des interactions entre la TBE et le feu. Si une épidémie de TBE ou un incendie important se produisait pendant la période transitoire où les forêts réagissent aux changements climatiques, le système pourrait s'effondrer complètement (Candau et Fleming, 2011). Dans un tel scénario, l'intensification des feux incontrôlés pourrait suffire à provoquer des interactions négatives. Ces interactions sont décrites dans des modèles de dynamique de la végétation qui prédisent que près de 50 % de la superficie brûlée augmentera, ce qui aurait pour effet d'augmenter la présence de forêts moins inflammables dominées par le tremble de même que le nombre de forêts récemment brûlées dans la région boréale (Krawchuk et Cumming, 2011). L'une des conséquences de cette prédiction serait de faire baisser la fréquence des incendies. La forêt ne supporterait également plus les infestations de TBE.

CONCLUSION

L'interaction entre la défoliation causée par la TBE et le feu incontrôlé est attribuable à l'accumulation de combustibles étagés qui permettent aux feux de surface d'atteindre la canopée (Candau et coll., 2018). Le climat, la fréquence de défoliation et la composition forestière sont les meilleurs facteurs de prédiction des zones les plus susceptibles de coïncider avec la période d'interaction entre la TBE et le feu. En comprenant que les zones où la fréquence de défoliation est modérée sont plus susceptibles d'être touchées par des incendies subséquents, les forestiers et les gestionnaires d'incendies sont plus à même d'anticiper les incendies de grande envergure et d'allouer des ressources.

Bien qu'il soit presque impossible de prédire avec certitude les effets des changements climatiques sur la défoliation causée par la TBE, les feux incontrôlés et leurs interactions

dans le centre du Canada, la tendance au réchauffement et l'augmentation des périodes de sécheresse indiquent que les cycles d'épidémie de la TBE et les feux incontrôlés pourraient se produire plus fréquemment, entraîner des changements spatio-temporels dans les deux régimes ou causer un effondrement complet de ces deux régimes de perturbations majeures. À mesure que les régimes de perturbation changeront, on devra adapter les techniques de gestion forestière.

RECHERCHES DU CFGL

La relation entre la défoliation attribuable à la TBE et les feux incontrôlés dans le centre du Canada est étayée par un nombre croissant de résultats expérimentaux et statistiques. Ils laissent entendre qu'une interaction entre la défoliation attribuable à la TBE et l'activité des feux déclarés est modulée par trois facteurs clés : 1) la gravité et la durée de la défoliation, 2) les caractéristiques des forêts (p. ex., l'âge, la composition) et 3) les conditions climatiques. Le CFGL étudie l'incidence de ces facteurs sur les interactions entre la défoliation et les feux afin d'améliorer les prévisions liées aux effets des changements climatiques sur ces interactions. Ils sont également en train de mettre au point un outil à l'échelle du paysage axé sur l'application de nos connaissances actuelles sur les processus en cause dans ces interactions afin de fournir des estimations de la quantité de combustible lié à la tordeuse des bourgeons et ses caractéristiques. Un tel outil améliorera probablement les évaluations du risque d'incendie à l'échelle du paysage dans la période suivant les épidémies de TBE.

RÉFÉRENCES

- Boulanger, Y.; Parisien, M.-A.; Wang, X. 2018. Model-specification uncertainty in future area burned by wildfires in Canada. *International Journal of Wildland Fire*. 27(164-175).
- Candau, J.-N.; Fleming, R.A.; Hopkin, A. 1998. Spatiotemporal patterns of large-scale defoliation caused by the spruce budworm in Ontario since 1941. *Can. J. For. Res.* 28(1733-1741).
- Candau, J.-N.; Fleming, R.A. 2005. Landscape-scale spatial distribution of spruce budworm defoliation in relation to bioclimatic conditions. *Can. J. For. Res.* 35(2218-2232).
- Candau, J.-N.; Fleming, R.A. 2011. Forecasting the response of spruce budworm defoliation to climate change in Ontario. *Can. J. For. Res.* 41(1948-1960).
- Candau, J.-N.; Fleming, R.A.; Wang, X. 2018. Ecoregional Patterns of Spruce Budworm – Wildfire Interactions in Central Canada’s Forests. *Forests*. 9(137-153).
- Fleming, R.A.; Candau, J.-N. 1998. Influences of climatic change on some ecological processes of an insect outbreak system in Canada’s boreal forests and the implications for biodiversity. *Environmental Monitoring and Assessment*. 49(235-249).
- Fleming, R.A.; Candau, J.-N.; McAlpine, R.S. 2002. Landscape-scale analysis of interactions between insect defoliation and forest fire in central Canada. *Climatic Change*. 55(251-272).
- Gauthier, S.; Bernier, P.; Kuuluvainen, T.; Shvidenko, A.Z.; Schepaschenko, D.G. 2015. Boreal forest health and global change. *Science*. 349(819-822).
- Girardin, M.P.; Mudelsee, M. 2008. Past and future changes in Canadian boreal wildfire activity. *Ecological Applications*. 18(391-406).
- Gralewicz, N.J.; Nelson, T.A.; Wulder, M.A. 2012. Factors influencing national scale wildfire susceptibility in Canada. *Forest Ecology and Management*. 265(20-29).
- Hanes, C.C.; Wang, X.; Jain, P.; Parisien, M.-A.; Little, J.M.; Flannigan, M.D. 2019. Fire-regime changes in Canada over the last half century. *Can. J. For. Res.* 49(256-269).
- Jain, P.; Wang, X.; Flannigan, M.D. 2018. Trend analysis of fire season length and extreme fire weather in North America between 1979 – 2015. *International Journal of Wildland Fire*. 26(12) 1009-1020.
- Krawchuck, M.A.; Cumming, S.G. 2011. Effects of biotic feedback and harvest management on boreal forest fire activity under climate change. *Ecological Applications*. 21(122-136).
- Liu, Y.; Goodrick, S.; Heilman, W. 2014. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Wildfire–climate interactions. *Forest Ecology and Management*. 317(80-96).
- Portier, J.; Gauthier, S.; Bergeron, Y. 2019. Spatial distribution of mean fire size and occurrence in eastern Canada: influence of climate, physical environment and lightning strike density. *International Journal of Wildland Fire*. 28(927-940).

- Pureswaran, D.S.; Neau, M.; Marchand, M.; De Grandpré, L.; Kneeshaw, D. 2019. Phenological synchrony between eastern spruce budworm and its host trees increases with warmer temperatures in the boreal forest. *Ecology and Evolution*. 9(576-586).
- Tremblay, J.A.; Boulanger, Y.; Cyr, D.; Taylor, A.R.; Price, D.T.; St-Laurent, M.-H. 2018. Harvesting interacts with climate change to affect future habitat quality of a focal species in eastern Canada's boreal forest. *PLoS ONE*. 13.
- Wang, X.; Thompson, D.K.; Marshall, G.A.; Tymstra, C.; Carr, R.; Flannigan, M.D. 2015. Increasing frequency of extreme fire weather in Canada with climate change. *Climatic Change*. 130(573-586).
- Wang, X., Parisien, M.-A.; Taylor, S.W.; Candau, J.-N. Stralberg, D.; Marshall, G.A.; Little, G.A. Flannigan, M.D. 2017. Projected changes in daily fire spread across Canada in the next century. *Environmental Research Letters*. 12 025005.
- Wang, X., Studens, K., Parisien, M.-A., Taylor, S.W., Candau, J.-N., Boulanger, Y., Flannigan, M.D. 2020. Projected changes in fire size from daily spread potential in Canada over the 21st century. *Environmental Research Letters* 15 (10), 104048.
- Wang, Y.; Hogg, E.H.; Price, D.T.; Edwards, J.; Williamson, T. 2014. Past and projected future changes in moisture conditions in the Canadian boreal forest. *The Forestry Chronicle*. 90(678-691).
- Wotton, B.M; Nock, C.A; Flannigan, M.D. 2010. Forest fire occurrence and climate change in Canada. *International Journal of Wildland Fire*, 19(3):253-271.
- Wotton, B.M; Flannigan, M.D.; Marshall, G.A. 2017. Potential climate change impacts on fire intensity and key wildfire suppression thresholds in Canada. *Environmental Research Letters*.



Pour voir plus de publications liées à la foresterie, rendez-vous sur le site Web des publications
du Service canadien des forêts à :

scf.rncan.gc.ca/publications