



# EXAMEN DES AVANCÉES CONCEPTUELLES EN MATIÈRE D'INTERACTIONS ENTRE LES PERTURBATIONS

Étape 1: Synthèse des connaissances, lacunes en  
matière de connaissances et prochaines étapes



# TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos.....	01
Contexte.....	01
Introduction.....	02
Avancées conceptuelles en matière d'écologie des perturbations : une brève introduction.....	03
Objectifs.....	04
Approche.....	04
Interactions entre les perturbations.....	05
Synthèse des connaissances.....	05
Lacunes de connaissances.....	22
Impacts des perturbations.....	24
Avancées conceptuelles et modélisation des interactions entre les perturbations.....	25
Théorie et pratique.....	25
Défis et perspectives.....	25
Discussion.....	26
Résumé.....	28
Prochaines étapes proposées pour 2023-2024.....	28
Références.....	28
Annexe - Glossaire des interactions entre les perturbations.....	42



## AVANT-PROPOS

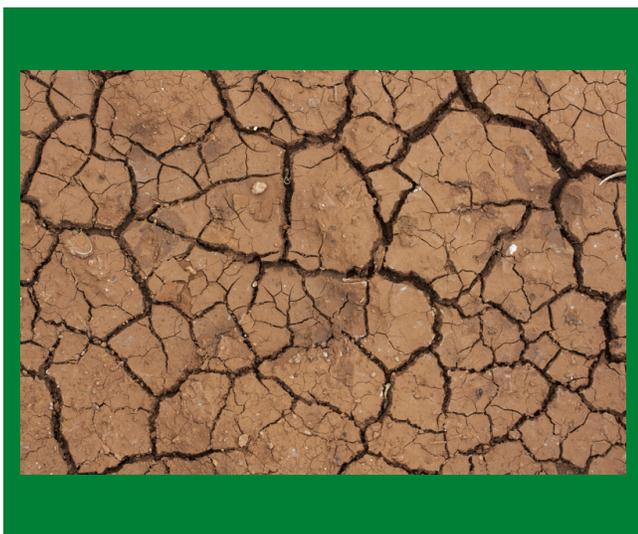
Le présent document aborde les interactions entre les perturbations causées par les ravageurs forestiers et les avancées en matière de modélisation conceptuelle, inspirées de deux ateliers du Groupe de travail sur les ravageurs forestiers, de la littérature grise, d'observations anecdotiques et d'articles évalués par des pairs, y compris des analyses systématiques, des méta-analyses ou des examens sélectifs récents. Malgré les efforts déployés pour inclure autant de documentation pertinente que possible, il était impossible de tout inclure compte tenu des contraintes de temps et de la quantité récente de documentation pertinente. Le présent document ne doit donc pas être considéré comme un examen exhaustif.



## CONTEXTE

Le Groupe de travail sur les ravageurs forestiers (GTRF), qui relève du Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF), travaille à l'élaboration de pratiques exemplaires en matière d'analyse, de prise de décision et d'intervention afin de rendre la lutte contre les ravageurs forestiers au Canada plus proactive, mieux coordonnée et, finalement, plus efficace. Ses travaux portent sur l'élaboration et la mise en œuvre d'une Stratégie nationale de lutte contre les ravageurs forestiers (SNLRF), fournissant un cadre intégré en matière de prévention, de détection et d'intervention. L'objectif est d'aider tous les territoires concernés à travailler ensemble pour maintenir des forêts saines et un secteur forestier durable. Pour ce faire, les gouvernements provinciaux, territoriaux, municipaux et fédéral collaborent dans le cadre de la Stratégie nationale de lutte contre les ravageurs forestiers, avec des plans de travail annuels fondés sur les intérêts nationaux.

Au cours de la dernière décennie, le GTRF a entrepris divers projets pour mieux comprendre les effets des changements climatiques sur les insectes et les maladies forestiers afin d'éclairer la gestion proactive des ravageurs forestiers et, finalement, l'adaptation. Parmi ces projets figure une évaluation de la vulnérabilité des politiques et des pratiques de surveillance de la santé des forêts (SSF), qui a permis de définir plusieurs possibilités d'adaptation pour renforcer la capacité d'adaptation et ainsi réduire la vulnérabilité de la SSF aux changements climatiques. En 2022, le GTRF a approfondi ce thème sous l'angle des impacts de l'adaptation et de l'interaction entre les perturbations, en reconnaissant que: 1) les agents de perturbation forestière (par exemple les incendies, la sécheresse, les pullulations d'insectes et les agents pathogènes) risquent de catalyser les changements de l'écosystème dans un contexte de réchauffement climatique et 2) les effets cumulés de l'interaction entre les perturbations pourraient avoir de graves conséquences sur les forêts futures comme sur les valeurs socio-économiques et écologiques qui en découlent. La première étape, décrite dans ce document, est une synthèse des connaissances sur les interactions entre les perturbations, les lacunes et les incertitudes associées, ainsi qu'un aperçu des applications actuelles de modélisation forestière qui portent sur les interactions entre les perturbations.



## INTRODUCTION

Les insectes et les maladies forestiers font partie intégrante des forêts canadiennes. Cependant, les changements climatiques affectent l'étendue, la gravité et la fréquence de leurs régimes de perturbation historiques. Les changements qui en résultent peuvent remettre en question la capacité à atteindre les objectifs en matière d'aménagement forestier durable sous les conditions futures. Des effets amplifiés, en cascade ou interéchelles risquent de dépasser les seuils écologiques ou les points de bascule, particulièrement dans les forêts de conifères et le biome boréal (Seidl et coll. 2017), y compris la forêt boréale méridionale (Brecka et coll. 2020, Frelich et coll. 2021, Chaste et coll. 2019, Boulanger et coll. 2021), la forêt acadienne (Taylor et coll. 2017) et les zones forestières boréales de l'Arctique (Foster et coll. 2022). Ainsi, des comportements imprévus pourraient se produire plus fréquemment dans les systèmes écologiques, ce que l'on appelle des surprises écologiques (Filbee-Dexter et coll. 2017). En effet, une étude systématique de la sensibilité du climat mondial à six facteurs de perturbation (incendie, sécheresse, vent, neige et glace, insectes et agents pathogènes) a révélé que 71 % des effets d'interaction enregistrés avaient un effet amplificateur. En revanche, seuls 16 % d'entre eux avaient un effet modérateur (Seidl et coll. 2017).

Les changements des régimes de perturbations naturelles dus aux changements climatiques remettront en cause la capacité à atteindre les objectifs de l'aménagement durable. L'incertitude qui entoure l'ampleur et la dynamique spatiale et temporelle de l'évolution des perturbations et le manque de connaissances sur les interactions entre les perturbations et les seuils des écosystèmes en sont la cause. Le réchauffement du climat pourrait également faciliter la propagation et l'établissement de ravageurs forestiers envahissants qui, autrement, n'auraient pas réussi à s'établir. Dans un contexte de changement et d'incertitude, les aménagistes forestiers ont besoin d'informations sur l'ampleur et la probabilité d'un changement des interactions et des régimes de perturbation et sur l'impact qui en résulte sur l'état des forêts dans un climat qui se réchauffe, afin d'aider à orienter l'adaptation et à informer la planification de l'aménagement forestier sur le long terme.

Les moyens d'évaluer les incidences potentielles des changements des régimes de perturbation induits par le climat sont essentiels à l'adaptation. Bien que les observations rétrospectives, par exemple les régimes historiques de ravageurs forestiers, soient utiles, elles ne sont pas représentatives des futurs paysages influencés par le climat et ont donc une application limitée. Les avancées conceptuelles dans le domaine de l'écologie des perturbations offrent un moyen de caractériser les interactions entre les perturbations et de contribuer à l'adaptation à l'aide de modèles conceptuels. Ce domaine d'étude s'est élargi en reconnaissance du potentiel de changement rapide, non linéaire et inattendu des forêts dû aux changements climatiques et aux pressions anthropogéniques, y compris la fragmentation des forêts. Les modèles conceptuels sont axés sur les processus et permettent d'intégrer les interactions, les causes et les effets des perturbations à différentes échelles temporelles et spatiales. Un examen récent des avancées conceptuelles et des approches empiriques de l'étude des interactions entre les perturbations (Sturtevant et Fortin, 2021) a révélé que les études récentes sont passées de régimes de perturbation basés sur des statistiques (c'est-à-dire statiques) à des méthodes basées sur des processus où les régimes de perturbation et les réactions de l'écosystème sont des comportements émergents (c'est-à-dire dynamiques).

L'incertitude croissante quant à l'évolution des perturbations forestières rend indispensables la qualification et la quantification des interactions entre les perturbations et les seuils des écosystèmes pour faciliter l'adaptation. Cependant, le manque de connaissances et d'intégration des modèles limite notre capacité à y parvenir. Une première étape pour combler cette lacune consiste à caractériser l'état actuel des connaissances sur les interactions entre les perturbations, notamment en ce qui concerne les insectes et les maladies forestiers, et les modèles conceptuels afin d'établir une base de référence pour l'évaluation et la prévision des états futurs. Les incertitudes et les lacunes en matière de connaissances seront ainsi mieux recensées, ce qui permettra d'orienter les discussions entre les experts de la santé des forêts et

de l'aménagement forestier concernant les lacunes en matière de connaissances, les incertitudes et les besoins en matière d'information et de recherche. Ces discussions pourraient être adaptées à des régions particulières du Canada et inclure une collaboration interdisciplinaire pour faire avancer notre compréhension des interactions entre les perturbations et leur application dans l'aménagement forestier.

## **AVANCÉES CONCEPTUELLES EN MATIÈRE D'ÉCOLOGIE DES PERTURBATIONS : UNE BRÈVE INTRODUCTION**

Les avancées conceptuelles dans le contexte de l'écologie des perturbations visent à fournir une compréhension commune des interactions entre les perturbations et leurs processus. La terminologie et les définitions utilisées pour décrire ces processus facilitent l'adoption d'une approche commune pour intégrer les interactions entre les perturbations dans les méthodes basées sur les processus. La section suivante, consacrée à la description des interactions et des processus de perturbation, s'inspire des travaux de Buma (2015), Kleinman et coll. (2019) et Burton et coll. (2020). Des termes et des définitions supplémentaires sont fournis à l'annexe 1.

D'une manière générale, les perturbations affectent soit la résistance de l'écosystème forestier, c'est-à-dire sa capacité à subir une perturbation sans changer, soit sa résilience, c'est-à-dire la capacité d'un écosystème forestier à retrouver ses conditions antérieures à la perturbation, le nouvel état du système étant qualifié de perturbation ou de legs biologique. L'héritage des perturbations qui modifie la résistance en augmentant ou en diminuant la probabilité d'une perturbation ultérieure, son étendue spatiale (probabilité à un endroit donné), son intensité ou sa gravité, est appelé perturbations liées. L'héritage des perturbations qui modifie la résilience, c'est-à-dire le taux ou la trajectoire de rétablissement des forêts après des perturbations ultérieures, est appelé interactions des composés. Ainsi, les interactions entre les perturbations se produisent lorsque l'héritage est fonctionnellement lié à une perturbation ultérieure, soit par

les facteurs de perturbation, soit par les mécanismes de rétablissement. Des perturbations liées et composées peuvent provenir d'un même événement.

Les interactions liées et composées peuvent potentiellement provoquer un comportement de perturbation qui dépasse les normes historiques et prend des directions inattendues en raison d'effets en cascade, par exemple une séquence de plus de deux perturbations, chacune étant déclenchée par la précédente. Lorsqu'une perturbation renforce l'impact d'une autre en diminuant la résistance ou la résilience, l'interaction est considérée comme amplifiée ou synergique. En revanche, l'effet tampon, la modération ou les interactions négatives décrivent des situations dans lesquelles une perturbation réduit l'impact d'une autre en augmentant la résistance ou la résilience. Les interactions interéchelles désignent les processus à une échelle spatiale ou temporelle qui interagissent avec des processus à une autre échelle, ce qui entraîne souvent une dynamique non linéaire avec des seuils (Peters et coll., 2007). Les effets cumulatifs correspondent à l'impact net de multiples facteurs de stress, de perturbations ou de dégradation. Quel que soit le type d'interaction, leurs caractéristiques temporelles et spatiales, les boucles de rétroaction et les seuils de l'écosystème sont tous des éléments essentiels de l'étude de l'interaction entre les perturbations.

## OBJECTIFS

L'objectif général de ce projet du GTRF est de synthétiser les avancées actuelles en matière de modèles conceptuels des interactions entre les perturbations forestières et leurs impacts combinés sur les valeurs forestières, en se fondant sur une meilleure compréhension des processus écosystémiques sous-jacents impliqués et des changements forestiers anticipés provoqués par le climat. La première étape, décrite dans ce document, est une synthèse des connaissances sur les interactions entre les perturbations, les lacunes et les incertitudes associées, ainsi qu'un aperçu des applications actuelles de modélisation forestière qui portent sur les interactions entre les perturbations.

## APPROCHE

Deux ateliers virtuels de synthèse des connaissances ont été organisés avec des représentants du monde universitaire, des chercheurs fédéraux et provinciaux et des organismes provinciaux et territoriaux de lutte contre les ravageurs forestiers venus de tout le Canada. Des déclarations affirmatives ont été utilisées pour aider à caractériser les perturbations et à déterminer les lacunes et les incertitudes en matière de connaissances. Les déclarations affirmatives servent d'outil dans diverses analyses du risque phytosanitaire dans le cadre de la Stratégie nationale de lutte contre les ravageurs forestiers. Elles ont pour objectif d'encourager la discussion et de rassembler des preuves pour étayer ou réfuter les affirmations. Dans ce cas, elles servent également à lancer la discussion, étant donné la complexité des perturbations en interaction.

Quatre déclarations affirmatives ont été formulées, dont trois axées sur un déclencheur abiotique et une sur la modélisation et sa capacité actuelle à éclairer l'adaptation et l'aménagement forestier. Les trois déclarations abiotiques représentent une sélection de scénarios observés dans le paysage canadien, tels qu'ils ont été définis par une équipe de travail constituée aux fins de ce projet. Les scénarios portaient notamment sur la sécheresse, les tempêtes violentes, le réchauffement climatique et les phénomènes météorologiques extrêmes. Les tempêtes violentes diffèrent des phénomènes météorologiques extrêmes dans la mesure où ces derniers sont définis comme des événements qui dépassent une valeur seuil proche de l'extrémité supérieure ou inférieure de la fourchette des mesures historiques. La quatrième déclaration concerne la modélisation des interactions entre les perturbations et la capacité à éclairer la gestion des ravageurs forestiers.

Les participants à l'atelier ont discuté de chaque déclaration affirmative et ont fourni des preuves à l'appui ou à l'encontre de chacune d'entre elles, y compris des travaux évalués par des pairs. Comme certaines discussions de l'atelier ont porté sur les interactions entre

les incendies de forêt et les ravageurs qui dépassaient le cadre des déclarations affirmatives, une section est consacrée aux incendies de forêt dans le contexte de ces discussions.

## INTERACTIONS ENTRE LES PERTURBATIONS

La section suivante présente une synthèse de l'état des connaissances et des lacunes en matière d'interaction entre les perturbations, à la lumière des éléments présentés lors des ateliers, de la littérature grise, des ouvrages évalués par des pairs et des observations anecdotiques concernant les scénarios d'interaction entre les perturbations liées à la sécheresse, aux tempêtes violentes, au réchauffement climatique et aux phénomènes météorologiques extrêmes. Comme certaines preuves ou lacunes dans les connaissances proviennent de travaux

menés dans les forêts des États-Unis, leur applicabilité aux forêts du Canada demeure incertaine. Néanmoins, elles servent de point de départ ou de référence pour d'autres travaux ou discussions.

## SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES

Outre les données propres aux ravageurs présentées lors des ateliers, des analyses systématiques, des méta-analyses ou des études sélectives récentes (tableau 1) ont permis d'établir des déclarations sommaires générales concernant les guildes de ravageurs forestiers. L'évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques réalisée par le GTRF a déjà permis de compiler les changements liés au climat qui affectent les perturbations causées par les ravageurs forestiers.

**Tableau 1. Analyse systématique, méta-analyse ou examen sélectif de la recherche sur les interactions entre les perturbations**

RÉFÉRENCE	ÉTENDUE GÉOGRAPHIQUE	SUJET	PÉRIODE D'EXAMEN
Fettig et coll. 2022	Amérique du Nord	Interactions entre les incendies et les insectes	2017 à 2022
Canelles et coll. 2021	Mondial	Interactions entre les ravageurs et d'autres perturbations	1990 à 2019
Kolb et coll. 2019	États-Unis	Impacts de la sécheresse sur les insectes et les maladies forestiers	1987 à 2014
Pureswaran et coll. 2018	Amérique du Nord	Insectes forestiers et changements climatiques	2013 à 2017
Seidl et coll. 2017	Mondial	Perturbations forestières dans le contexte des changements climatiques	1990 à 2017
Jactel et coll. 2012	Mondial	Effets de la sécheresse sur les dommages causés par les insectes et les pathogènes forestiers	Inconnu

## SÉCHERESSE

Dans une étude mondiale sur la mortalité des arbres due à la sécheresse et à la chaleur, les auteurs ont conclu que tous les écosystèmes forestiers étaient vulnérables, y compris ceux qui ne sont pas considérés comme limités en eau (Allen et coll. 2010). Au Canada, la sécheresse et les incendies forestiers risquent d'avoir un impact significatif sur l'approvisionnement en bois et la productivité de la forêt boréale méridionale (Brecka et coll. 2020). La sécheresse affecte à la fois l'hôte et le ravageur forestier, la réaction et la sensibilité de l'hôte variant selon l'espèce d'arbre (Aubin et coll. 2018) et le lieu (Peng et coll. 2011), et le ravageur forestier selon la guildes alimentaire. Les associations communautaires, y compris la synchronie des ennemis naturels, sont également affectées par la sécheresse, mais ont été moins étudiées par rapport aux changements climatiques.

La gravité, la fréquence et la durée de la sécheresse influencent la nature de la réaction de l'hôte et du ravageur forestier. Si la sécheresse peut à elle seule entraîner la mortalité des arbres, elle peut également agir comme un facteur de stress abiotique prédisposant les arbres aux facteurs biotiques et influençant les perturbations ultérieures. Des sécheresses chroniques ou répétées de faible intensité peuvent avoir une plus grande influence sur la mortalité des arbres qu'un épisode de sécheresse extrême, avec des taux de mortalité plus élevés pour le peuplier faux-tremble et les espèces tolérantes à l'ombre après une succession de sécheresses de faible intensité dans les forêts boréales du Canada (Sánchez-Pinillos et coll. 2021). Si l'on considère uniquement l'adéquation au climat, les effets cumulés de toutes les perturbations devraient entraîner l'évolution des biomes boréaux méridionaux vers des forêts plus tempérées au cours du 21<sup>e</sup> siècle (Frelich et coll. 2021).

Jactel et coll. (2012), Kolb et coll. (2016), Pureswaran et coll. (2018), et Canelles et coll. (2021) présentent les analyses les plus récentes des effets de la sécheresse sur les insectes et les maladies forestiers. À l'exception de Jactel et coll. (2012), les auteurs organisent leurs résultats par guildes

alimentaire ou groupe de pathogènes et les déclarations suivantes sont donc regroupées de cette manière. Les conclusions générales des études systématiques susmentionnées concernant les guildes alimentaires ou les perturbations sont les suivantes :

- La réaction non linéaire à la sécheresse pour les scolytes dans les forêts de l'ouest des États-Unis, avec un stress modéré lié à la sécheresse qui affecte négativement les populations de scolytes, alors qu'un stress intense lié à la sécheresse affecte positivement les populations. En effet, la réduction des mécanismes de défense de l'hôte due au stress hydrique et aux températures plus chaudes entraîne une augmentation des taux de survie et du voltinisme.
- Dans les forêts de l'est des États-Unis, aucune preuve de l'influence de la sécheresse sur le dendroctone méridional du pin n'a été observée.
- Les effets de la sécheresse sur la guildes des défoliateurs ne sont pas concluants dans la mesure où tant des effets positifs, par exemple l'augmentation des niveaux d'azote dans le feuillage améliore la performance des larves, que des effets négatifs, par exemple l'augmentation des métabolites secondaires qui inhibent la performance des larves, ont été rapportés.
- Des sécheresses modérées suivies de précipitations sont à l'origine des performances et des impacts les plus importants des pics buveurs de sève, tels que le puceron lanigère de la puche.
- La réaction des agents pathogènes forestiers à la sécheresse varie : les agents pathogènes primaires (rouilles, *Phytophthora*, agents pathogènes des feuilles et des aiguilles) peuvent diminuer en raison de la baisse du taux d'humidité, tandis que les agents pathogènes secondaires qui colonisent les arbres stressés (maladies des racines) réagissent favorablement, ce qui entraîne une augmentation du taux de mortalité de l'hôte.
- Le climat (plus chaud et plus sec) joue un rôle clé dans la mortalité due au déclin du tremble, alors que les

insectes forestiers et les herbivores jouent un rôle secondaire et ont plus d'influence sur la réduction de la croissance que sur la mortalité.

- La sécheresse peut entraîner à la fois une augmentation à court terme et une diminution à long terme de l'activité des incendies forestiers, en raison de l'augmentation des combustibles et des changements dans les caractéristiques de la forêt, notamment des espèces, de la structure et de la densité.
- Des conditions météorologiques plus sèches et plus chaudes augmenteront l'incidence des incendies de courte durée dans les forêts boréales du nord-ouest et amplifieront les changements écologiques que ces événements provoquent, car l'activité des incendies forestiers et des sécheresses après les incendies augmente de manière synergique. Ces perturbations

en interaction accéléreront les changements provoqués par le climat sur la structure et la composition de la future forêt boréale (Whitman et coll. 2019).

- La vulnérabilité des hôtes aux ravageurs forestiers suivant la sécheresse n'est pas concluante. Certaines études suggèrent une vulnérabilité réduite en raison d'un environnement moins favorable, tandis que d'autres suggèrent une vulnérabilité accrue en raison des dommages causés aux racines ou aux cimes par des facteurs biotiques.

Le tableau 2 résume les preuves et les projections concernant les interactions entre les perturbations abiotiques et biotiques dues à la sécheresse.

**Tableau 2. Preuves et projections des perturbations abiotiques et biotiques dues à la sécheresse par zone géographique (uniquement au Canada et aux États-Unis), par type de forêt et par interaction.**

AUTEUR/ TYPE	SUPERFICIE	TYPE DE FORÊT	INTERACTION	COMMENTAIRES
ABIOTIQUE				
Foster et coll. 2022	T.N.-O.	Zones de pergélisol	Incendies, dégel du pergélisol et inondations	Effets amplifiés : dégel accru du pergélisol après plusieurs années d'incendies forestiers, qui suivent de longues années de sécheresse. Augmentation des inondations due au dégel du pergélisol (comm. pers. J. Olesinski, novembre 2022).
Chen et coll. 2017	Alb.	Tremble boréal	Déclin	La sécheresse est la principale cause du déclin. Les défoliateurs des feuillus (LF, TT) présenteraient tous deux une variabilité spatio-temporelle, les futures pullulations pouvant être déclenchées par des printemps plus précoces plutôt que par la sécheresse.

AUTEUR/ TYPE	SUPERFICIE	TYPE DE FORÊT	INTERACTION	COMMENTAIRES
Harvey et coll. 2021, Smith et coll. 2015	Montagnes Rocheuses	Sapin subalpin	Déclin	Interactions interéchelles entre le site, la sécheresse et le déclin.
Michaelian et coll. 2010	Sask. et Alb.	Tremble boréal	Déclin	Mortalité importante due à la sécheresse (20 %) dans la zone d'étude contre 7 % dans les zones qui n'ont pas connu de sécheresse.
Woods et coll. 2010	C.-B.	Tous	Déclin/dépérissement	Prévisions : le réchauffement climatique et la sécheresse risquent d'entraîner une sécheresse ou un déclin de plusieurs espèces d'arbres dû au climat.
Refsland et Cushman 2021	Amérique du Nord	Tremble	Déclin	Mortalité élevée et taux de croissance réduits chez le tremble associés à des conditions climatiques plus chaudes et plus sèches, suivis d'une concurrence accrue et de l'herbivorisme, notamment de la livrée des forêts et de la mineuse serpentine du tremble. Les interactions entre les variations spatiales et temporelles du climat et entre le climat et l'herbivorisme ont affecté la croissance des arbres.
Bigler et coll. 2017	Montagnes Rocheuses américaines	Haute altitude	Mortalité	Le sapin subalpin et l'épinette d'Engelmann étaient plus sensibles à la mortalité due à la sécheresse que le pin tordu latifolié. Les arbres à faible croissance étaient plus susceptibles de mourir.
Observation	Sask.	Brise-vent	Mortalité	Mortalité et défaillance de l'épinette blanche mature dans les brise-vent de l'écozone des prairies.
Worrall et coll. 2013	Amérique du Nord	Tremble	Gel-ravageurs-déclin	Effets amplifiés par le déclin causés par la livrée des forêts et d'autres ravageurs secondaires. Le gel est un facteur de déclin dans certaines régions.

AUTEUR/ TYPE	SUPERFICIE	TYPE DE FORÊT	INTERACTION	COMMENTAIRES
Boiffin et coll. 2013	Qc.	Épinette noire	Incendie	Les longues années d'incendies forestiers qui ont suivi les périodes de sécheresse ont entraîné des conditions défavorables pour l'épinette noire et la probabilité d'un échec de la régénération ou d'un passage à des forêts de pin gris.
BIOTIQUE				
Kolb et coll. 2019, Erbilgin et coll. 2021	Arizona	Pin ponderosa	Scolyte	Expérimental : la sécheresse modifie les mécanismes de défense des arbres contre les scolytes.
Agne et coll. 2018	Nord-Ouest du Pacifique	Douglas taxifolié	DD, TNR	Stress hydrique prédisposant les arbres aux attaques du dendroctone du Douglas et des insectes secondaires porteurs de la TNR.
Maclauchlan et Brooks 2020	C.-B.	Haute altitude	CS	Augmentation de l'incidence causant la mortalité du sapin subalpin après une période de sécheresse, souvent en association avec le scolyte du sapin de l'ouest. Il peut être considéré ou traité comme un ravageur primaire ou secondaire.
Observation	Man., Sask., Ont.	Mélèze laricin	DM	Incidence accrue de mortalité en cas de sécheresse.
Preisler et coll. 2012	Washington, Oregon	Pin tordu latifolié	DPP	L'effet de la sécheresse sur la mortalité des arbres peut varier en fonction du retard et de la durée de la pullulation.
Hart et coll. 2014	Colorado	Épinette	DE	La sécheresse modifie les mécanismes de défense des arbres contre les scolytes.
Garbutt et coll. 2006	Yukon	Épinette blanche	DE	La pullulation s'est intensifiée en raison des arbres stressés par la sécheresse et des étés plus chauds, ce qui a entraîné un cycle d'un an.

AUTEUR/ TYPE	SUPERFICIE	TYPE DE FORÊT	INTERACTION	COMMENTAIRES
Observation	Sask.	Prairies	SFO	Augmentation de la mortalité des frênes dans les parcs des prairies.
Howe et coll. 2022	C.-B.	Sapin subalpin	SSO	Extension de l'aire de répartition en altitude et en latitude, augmentation de la période de croissance, de l'accumulation de degrés-jours et du stress de sécheresse.
Howe et coll. 2022	C.-B.	Haute altitude	SSO	Le stress de sécheresse affecte les pullulations de scolytes du sapin de l'ouest.
Koontz et coll. 2021	Californie	Pin ponderosa	DOP	Interactions interéchelles entre les attributs des forêts et des arbres, la sécheresse et les taux de mortalité.
Robbins et coll. 2022	Californie	Pin ponderosa	DOP	Augmentation de 30 % de la mortalité des hôtes par rapport à la hausse seule des températures, due au dendroctone occidental du pin associé à la sécheresse.
Observation	Sask.	Collines Cypress	SDP, CA	Le scolyte du pin a attaqué des arbres prédisposés par Armillaria et le chancre atropellien.
Woods et coll. 2010	C.-B.	Pin tordu latifolié	Insectes secondaires	Mortalité importante de jeunes plants de pin tordu latifolié due à la sécheresse et à des insectes secondaires.
Moise et coll. 2019	N.-B.	Sapin baumier	TBE	Expérimental : une étude a révélé que la densité du peuplement avait davantage d'influence que la sécheresse sur les performances de la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans des conditions de pullulation.
Balducci et coll. 2021	Région boréale de l'Est	Sapin baumier, épinette noire	TBE	La défoliation qui précède la sécheresse augmente la résistance des arbres à la sécheresse en raison de la diminution des surfaces de photosynthèse et de transpiration.

AUTEUR/ TYPE	SUPERFICIE	TYPE DE FORÊT	INTERACTION	COMMENTAIRES
Itter et coll. 2019	Région boréale de l'Est et de l'Ouest	Est - forêts de conifères Ouest - bois mixte	Est - TBE Ouest - LF	La défoliation par les insectes peut compenser les effets du déficit hydrique sur la croissance des arbres boréaux en réduisant la demande en eau par transpiration.
Observation	T.N.-O.	Tremble	LF	Deux grandes pullulations de LF ont suivi des années de sécheresse extrême.
Observation	Qc.	Érable	LF	Interaction entre la mortalité, la défoliation et le stress de la sécheresse.
Cooke et Roland, 2007	Ont.	La région boréale	LF	La sécheresse n'a pas eu d'impact perceptible sur la croissance des arbres alors que la LF en a eu.
Michaelian et coll. (sous presse)	Canada	Tremble	LF	Lorsque la sécheresse et la défoliation se chevauchent, les perturbations sont amplifiées.
Volney et Fleming 2000	Ontario	Pin gris	TPG	Une sécheresse de 7 à 4 ans avant une pullulation a été fortement associée à l'apparition de la défoliation par la tordeuse du pin gris au Canada. Les sécheresses déclenchent la production de fleurs, ce qui a une incidence sur les pullulations de TPG.
Woods et coll. 2010	C.-B.	Douglas taxifolié	TOE-DD	Sécheresse ou prédisposition à la défoliation par la tordeuse occidentale de l'épinette, facteurs de pullulation du dendroctone du Douglas.
Observation	Alb., Sask.	Pin gris	FG	Mortalité du pin gris infecté par le faux-gui, ce qui pourrait augmenter le risque d'incendie.

AUTEUR/ TYPE	SUPERFICIE	TYPE DE FORÊT	INTERACTION	COMMENTAIRES
Kolb et coll. 2016	Ouest des États-Unis	Espèces hôtes	FG	Les arbres infectés par le gui sont prédisposés aux scolytes et aux perce-bois pendant les périodes de sécheresse.
Cruickshank et Filipescu 2017	C.-B.	Douglas taxifolié	IPA	Expérimental : les changements des propriétés du bois suite à l'infection de pourridié-agaric augmentent la tolérance à la sécheresse. Des sécheresses plus fréquentes peuvent favoriser la sélection d'arbres plus résistants à une IPA.
Hennon et coll. 2020	Canada- États-Unis	Pin argenté	Brûlure des perchis du pin argenté	Interactions entre la sécheresse et le site à l'origine du déclin du pin argenté.

DDD = dendroctone du Douglas; CS = charançon du sapin; DM = dendroctone du mélèze; DPP = dendroctone du pin ponderosa; DE = dendroctone de l'épinette; SFO = scolyte du frêne de l'Ouest; SSO = scolyte du sapin de l'Ouest; DOP = dendroctone occidental du pin; SDP = scolyte du pin; TBE = tordeuse des bourgeons de l'épinette; LF= livrée des forêts; TPG = tordeuse de pin gris; TT= tordeuse du tremble; TOE = tordeuse occidentale de l'épinette; FG = faux-gui; IPA = infection de pourridié-agaric; TNR = tache noire des racines; CA = chancre atropellien.

Les observations proviennent de gestionnaires provinciaux ou territoriaux de la lutte contre les ravageurs forestiers.

## TEMPÊTES VIOLENTES

Les tempêtes violentes, comme les pluies, le vent, la neige, la glace et la grêle, peuvent causer des dommages importants aux paysages forestiers. Selon la gravité des tempêtes, elles peuvent également être qualifiées de phénomènes météorologiques extrêmes, dont il est question dans la section suivante. Les dégâts causés par les tempêtes violentes peuvent se manifester sur les arbres, les peuplements ou les paysages, avec des répartitions spatiales variables en fonction de l'intensité des tempêtes. En outre, les séquelles des tempêtes peuvent accroître le risque d'autres perturbations dues à des scolytes primaires et secondaires, à des agents pathogènes et à des incendies forestiers. Bien que limitées, les recherches sur les tempêtes violentes portent généralement sur les legs des tempêtes et sur les interactions avec les perturbations qui en résultent.

- Les phénomènes météorologiques violents survenus dans les T.N.-O. pendant le dôme de chaleur de 2021 ont été à l'origine d'orages et de rafales descendantes intenses, qui ont causé des dommages dus au vent sur plus de 20 000 hectares, l'examen des images satellite révélant des dommages visibles et continus sur des arbres dans un rayon de plus de 60 km et jusqu'à 9 km de large.
- Les tempêtes violentes dans la forêt boréale sont imprévisibles dans l'espace et dans le temps, avec des impacts relativement mineurs sur le paysage (Bouchard et coll. 2009).
- La fréquence accrue des tempêtes de vent combinée aux incendies favorisera la succession des espèces décidues dans les forêts boréales méridionales du Minnesota (Anoszko et coll. 2022).
- Les dommages cumulés causés par les tempêtes hivernales, comme les arbres abattus et endommagés, ont précipité l'apparition du dendroctone de l'épinette dans le nord-est de la Colombie-Britannique.
- L'ouragan Juan a favorisé la croissance et l'expansion d'un ravageur invasif, le longicorne brun de l'épinette, dans les forêts indigènes.
- Les scolytes ont tué les arbres sains qui subsistaient encore après la tempête de l'hiver 2012 au Manitoba.
- Les orages violents sont souvent accompagnés d'éclairs, ce qui peut provoquer des incendies forestiers.
- Les conclusions des études sur les tempêtes de glace de 1998 (Ryall et Smith 2001, Ryall et Smith 2005, Ryall et coll. 2006, Deschênes et coll. 2019, Lloren et coll. 2020):
  - Les dommages causés par la tempête de verglas variaient selon les caractéristiques des peuplements, y compris les espèces d'arbres pour les conifères et les arbres décidus. Les dommages aux plantations de pin rouge étaient les plus importants dans les peuplements mal aménagés et surpeuplés.
  - Chez les peuplements de feuillus, la résistance aux tempêtes de verglas augmentait plus la distance entre les dommages et la lisière du peuplement était grande (QC), alors que l'inverse était vrai pour les peuplements de conifères (ON).
  - Les arbres situés à l'intérieur des plantations de pins rouges étaient trois à cinq fois plus susceptibles d'être endommagés (ON).
  - Les parties les plus endommagées des peuplements décidus sont moins résistantes et plus susceptibles de modifier la composition des communautés.
  - Les effets à court terme des dommages causés par les tempêtes sur les peuplements décidus étaient amplifiés là où il y avait moins de forêt dans le paysage environnant et plus loin de la lisière de la forêt, ce qui s'explique par le contexte paysager.
  - Aucune interaction n'a été observée entre l'ampleur des dommages causés par la tempête de verglas et la cochenille du hêtre, mais une interaction avec la maladie corticale du hêtre est soupçonnée.

- Le scolyte du pin et le longicorne noir préféraient s'attaquer aux arbres endommagés par la tempête de verglas et ne colonisaient pas les arbres sains dans les plantations de pin rouge de l'Ontario. Les populations ont évolué en fonction de la disponibilité d'arbres stressés et endommagés.

## RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES

Les insectes forestiers sont particulièrement sensibles à la température et aux conditions environnementales. Ainsi, la majorité des réactions des insectes forestiers au réchauffement climatique devraient être positives, avec un temps de génération plus court, une fécondité et une survie plus élevées, conduisant à l'expansion de l'aire de répartition et à des pullulations (Jactel 2019). Currano et coll. (2008) ont noté que l'augmentation du CO<sub>2</sub> et de l'azote foliaire pourrait également entraîner une augmentation de l'alimentation et des dommages causés par les insectes, comme en témoigne un précédent épisode de réchauffement climatique (le maximum thermique du paléocène-éocène - PETM), ainsi qu'une réduction des mécanismes de défense chez les latifoliées en raison de l'amincissement des feuilles (Li et coll., 2016). De même, De Grandpré et coll. (2022) ont constaté une augmentation de la valeur nutritionnelle de l'hôte à partir des sciures de tordeuse des bourgeons de l'épinette et du dépôt de litière et avancent que de telles conditions pourraient conduire à l'autoamplification des populations de défoliateurs et à la capacité de provoquer des pullulations à grande échelle. Une baisse des taux de parasitisme pourrait également contribuer à l'augmentation de la fréquence des pullulations (Pureswaran et coll. 2018). Toutefois, des conditions météorologiques plus chaudes pourraient entraîner un décalage phénologique et des changements dans les régimes thermiques des insectes forestiers, ce qui pourrait perturber la saisonnalité.

La réaction des agents pathogènes forestiers au réchauffement climatique dépendra de l'humidité, d'où

l'approche « plus chaud et plus humide » ou « plus chaud et plus sec » adoptée par l'USDA pour décrire l'évolution des maladies forestières en fonction du climat. Dans un scénario de changements climatiques avec des conditions futures plus chaudes et plus sèches, Sturrock (2011) a prédit que les maladies causées par des agents pathogènes directement affectés par le climat (par exemple, la brûlure en bandes rouges) auront un impact réduit ou inchangé sur leurs hôtes, mais un impact accru dans un scénario de conditions plus chaudes et plus humides. Pour les maladies causées par des agents pathogènes indirectement affectés par le climat (par exemple, une infection de pourridié-agaric) et pour les maladies de dépérissement en général, Sturrock et coll. (2011) ont prédit un impact accru sur les hôtes dans un scénario de changements climatiques avec des conditions futures plus chaudes et plus sèches et un impact réduit ou inchangé dans des conditions futures plus chaudes et plus humides. Dans l'ensemble, les dommages causés par les pathogènes forestiers devraient augmenter au vu des interactions observées et prévues entre les pathogènes forestiers et les changements de température et de précipitations (Teshome et coll. 2020).

Dans un examen récent des interactions entre les perturbations forestières, Seidl et coll. (2017) ont constaté que les variables liées à la température étaient les facteurs climatiques les plus importants signalés dans la documentation sur les perturbations forestières (42 %), et que les effets sur le régime des perturbations étaient les plus élevés dans le biome boréal. L'expansion de l'aire de répartition de plusieurs facteurs biotiques en Amérique du Nord est due à des changements phénologiques de l'hôte ou du ravageur forestier en fonction de la température. De meilleurs taux de survie et de croissance en hiver, ou un voltinisme accru, ont déjà été observés pour la tordeuse des bourgeons de l'épinette, le dendroctone méridional du pin, le dendroctone du pin ponderosa, le puceron lanigère de la pruche et la spongieuse (Pureswaran et coll., 2018). Parmi les exemples d'échec de l'expansion de l'aire de répartition, citons celui de l'arpenteuse de la pruche du Canada dans la Côte-Nord, au Québec, qui a été brusquement interrompu par deux vagues de froid extrême

en un seul hiver (Delisle et coll., 2019). Fait intéressant, le réchauffement qui a précédé la dispersion était semblable à celui qui s'est produit pour l'*Epirrita autumnata* dans les forêts de bouleaux de Fenno-Scandia, où elle est parvenue à étendre son aire de répartition (Delisle et coll. 2019).

Les phénomènes météorologiques extrêmes sont ceux qui dépassent les seuils normaux et peuvent être dus à la température, aux précipitations ou au vent. Ces événements auront des effets variables sur les ravageurs forestiers et leurs hôtes, en fonction de leur type, de leur gravité et de leurs caractéristiques spatio-temporelles. Les températures extrêmes peuvent causer des dommages considérables en raison des perturbations phénologiques et du stress aigu des arbres et comprennent à la fois la chaleur extrême, comme les dômes de chaleur, et le froid extrême, comme les vortex polaires. Le stress aigu provoque une pulsation de la ressource, tandis que le stress chronique conduit à une pression ou à une dégradation de la ressource. Des facteurs de stress

biotiques ou abiotiques multiples peuvent accroître la vulnérabilité aux facteurs de stress ultérieurs et modifier ainsi la dynamique d'un écosystème (Nolet et Kneeshaw, 2018). Pour ce qui est des perturbations phénologiques, de vastes zones pourraient être affectées, car les crêtes persistantes des latitudes moyennes dans le courant-jet, qui entraînent de longues périodes de temps anormalement chaud, sont de plus en plus fréquentes à mesure que l'Arctique se réchauffe et peuvent se produire à des échelles spatiales sous-continentales (Frelich et coll., 2021). Un stress aigu dû à un ou plusieurs événements extrêmes ou à des événements biotiques et abiotiques concomitants pourrait également amplifier la mortalité des arbres liée aux ravageurs (De Grandpré et coll. 2019).

Le tableau 3 résume les preuves et les projections des interactions entre les perturbations abiotiques et biotiques induites par le réchauffement climatique ou les phénomènes météorologiques extrêmes.

**Tableau 3. Preuves et projections des perturbations abiotiques et biotiques dues au réchauffement climatique ou à des phénomènes météorologiques extrêmes, par zone géographique (uniquement au Canada et aux États-Unis), par type de forêt et par interaction.**

AUTEUR/ TYPE	SUPERFICIE	FORÊT / HÔTE	INTERACTION	COMMENTAIRES
Foster et coll. 2022	T.N.-0.	Région boréale de l'Arctique	Tous	Effets amplifiés de toutes les perturbations, avec risque de changements persistants dans la composition de la végétation, ainsi que de colonisation et de propagation accrues d'espèces végétales non indigènes et envahissantes.
ABIOTIQUE				
Girardin et coll. 2022	Canada	Toutes les espèces	Gel de la saison froide	Les changements dans la fréquence du gel en saison froide favorisent les espèces de pins.

AUTEUR/ TYPE	SUPERFICIE	FORÊT / HÔTE	INTERACTION	COMMENTAIRES
Observation	Ont.	Pin gris	Froid extrême	Une vague de froid suivant le débourrement a entraîné un dépérissement et des mortalités dans des plantations de pins gris de plus d'un million d'hectares.
Observation	Ont.	Peuplier faux-tremble	Déclin	Déclin des symptômes du tremble sur plus de 15 millions d'hectares en raison du manque de neige.
Comeau et coll. 2019; 2021; Comeau et Daniels, 2022	Haïda Gwaii	Cyprès jaune	Hivers plus chauds avec peu de précipitations	Les dommages causés aux racines par le gel en raison des températures hivernales élevées et des faibles précipitations hivernales ont entraîné un déclin, exacerbé par l'oscillation décennale du Pacifique.
Hennon et coll. 2012	Alaska	Cyprès jaune	Des hivers plus chauds, un manteau neigeux moins épais et des printemps plus froids	Le réchauffement hivernal plus fréquent a entraîné un faible durcissement par le froid et une diminution de l'accumulation de neige, ce qui a réduit la protection des racines par la neige.
Nolet et Kneeshaw (2018)	Qc.	Érable, hêtre	Gel-dégel, sécheresse, livrée des forêts	Un épisode de gel-dégel suivi d'une sécheresse et d'une défoliation par la LF sur une période de 3 ans a eu un impact négatif sur le rétablissement de l'érable à sucre et un impact beaucoup moins important sur le hêtre.
Observation	Sask.	Conifères	Nappe d'eau près de la surface du sol et Monochamus	Les peuplements de pins en lisière du bloc de coupe, affectés par le niveau élevé de la nappe d'eau, ont ensuite été tués par le Monochamus.
Observation	T.N.-O.	Peuplier faux-tremble	Dôme de chaleur – tempêtes violentes – déracinement par le vent	Des températures extrêmes ont provoqué de violentes tempêtes, qui ont entraîné le déracinement par le vent de 20 000 hectares de trembles.

AUTEUR/ TYPE	SUPERFICIE	FORÊT / HÔTE	INTERACTION	COMMENTAIRES
Observation	Alb.	La région boréale	Dôme de chaleur	Les populations de défoliateurs ont chuté l'année suivant le dôme de chaleur.
Observation	Nord-ouest de l'Ontario	Pin gris	Phénomène météorologique extrême	Un froid extrême après l'éclosion des bourgeons a entraîné le dépérissement et la mortalité de plantations de pins gris sur plus de 1 million d'hectares.
Woods et coll. 2010	C.-B.	Épinette d'Engelmann	Phénomènes météorologiques violents - DE	Prévision : augmentation de la probabilité des pullulations de DE en raison des déracinements dus au vent causés par des phénomènes météorologiques plus fréquents.
Frelich et coll. 2021	Canada-États-Unis	Région boréale méridionale	Incendie forestier	Prévision : un climat plus chaud augmentera le nombre de jours marqués par des tempêtes de vent convectives extrêmes, ce qui asséchera les combustibles et augmentera le risque de déclenchement d'incendies forestiers.
BIOTIQUE				
Chandler et coll. 2021	Nord-Est des É.U.	Pruche du Canada	PLP	La baisse de la densité de PLP en 2019 est le résultat d'une augmentation de la mortalité indirectement due aux précipitations anormalement élevées de l'été et de l'automne 2018. Une augmentation des champignons entomopathogènes indigènes associée à des conditions plus humides est soupçonnée d'être à l'origine de la mortalité.
Hubermann et coll. 2022	T.N.-O.	Pin gris	DPP	Expansion de l'aire de répartition : un arbre appâté a été attaqué en 2012 près de la frontière de l'Alberta.

AUTEUR/ TYPE	SUPERFICIE	FORÊT / HÔTE	INTERACTION	COMMENTAIRES
Alberta Forest Health and Adaptation, 2019	Alberta	Pin tordu latifolié	DPP	Le froid extrême, notamment le vortex polaire de février 2019, a entraîné d'importants taux de mortalité hivernale du dendroctone du pin ponderosa, comme prévu par MacQuarrie et coll. 2019.
Aukema et coll. 2008	C.-B.	Pin tordu latifolié	DPP	Des températures hivernales et estivales plus chaudes expliquent les probabilités de pullulation sur une période de 15 ans.
Preisler et coll. 2012	Washington, Oregon	Pin tordu latifolié	DPP	Les températures hivernales plus chaudes et la sécheresse ont affecté la taille d'une pullulation, alors que les précipitations de l'année précédente ont eu un effet positif, peut-être en raison de la taille du couvain. Les précipitations cumulées sur deux ans ont eu un effet négatif.
Bleiker 2019	Canada	Pinus spp	DPP	Le climat a facilité l'expansion vers l'est dans les nouvelles forêts de pins.
Bentz et coll. 2010; 2014; 2016	É.-U., C.-B.	Épinette, pin tordu latifolié, pin à écorce blanche	DE et DPP	Extension de l'aire de répartition : amélioration de l'adéquation du climat à des latitudes et des altitudes plus élevées.
Observation	C.-B.	Épinette	DE	Des températures plus chaudes ont entraîné une augmentation du voltinisme et ont influencé la pullulation actuelle dans le nord-est de la Colombie-Britannique.
Robbins et coll. 2022	Californie	Pin ponderosa	DOP	Les températures plus chaudes ont entraîné une augmentation du voltinisme du DOP et une augmentation de la mortalité de l'hôte liée à la sécheresse.
Dooley et Six 2015		Pin à écorce blanche	RVPB-DPP	Les arbres gravement infectés par la RVPB présentaient de plus faibles taux d'attaque, probablement en raison de défenses plus faibles et parce que moins d'adultes étaient nécessaires pour attaquer. Cependant, les taux d'émergence et la taille du couvain étaient plus élevés que sur les arbres non infectés ou les arbres moins sévèrement infectés.

AUTEUR/ TYPE	SUPERFICIE	FORÊT / HÔTE	INTERACTION	COMMENTAIRES
Maclauchlan et coll. 2023	C.-B.	Sapin subalpin	SSO	Des données indiquent que le SSO pourrait permettre de réduire le temps de croissance à un an.
Howe et coll. 2022	C.-B.	Sapin subalpin	SSO	Extension de l'aire de répartition en altitude et en latitude, augmentation de la période de croissance, de l'accumulation de degrés-jours et du stress de sécheresse.
Lalande et coll. 2020	Colorado	Sapin subalpin	IPA-TNR-SSO- densité	Interaction complexe entre les ravageurs, le climat et la densité du peuplement dans le dépérissement du sapin subalpin.
Pureswaran et coll. 2015	Qc.	Sapin baumier/ épinette	TBE	Extension de l'aire de répartition : défoliation au nord de la répartition historique au Québec.
Hubermann et coll. 2022	T.N.-O.	Épinette Arbres et arbustes	TBE Livree du nord	Extension de l'aire de répartition dans le delta du Mackenzie : le record le plus septentrional du Canada. Pullulations plus fréquentes.  Expansion de l'aire de répartition : expansion antérieure vers le nord de Norman Wells en 2012 dans la taïga des plaines à Inuvik.
Ward et coll. 2020	C.-B., Alb.	Mélèze subalpin	PCM	Prévision : extension de l'aire de répartition. Le réchauffement climatique pourrait étendre l'aire de répartition aux mélèzes subalpins de plus haute altitude.
Bellemin-Noel et coll. 2021; Pureswaran et coll. 2018; 2019 Portalier et coll. 2022	La région boréale	Épinette noire	TBE	Possibilité d'expansion de l'aire de répartition septentrionale en raison d'une meilleure synchronicité avec la phénologie de l'épinette noire et d'une gravité accrue dans les peuplements mixtes de sapins baumiers et d'épinettes noires dans l'aire de répartition historique.
Regnière et coll. 2012; Portalier et coll. 2022	La région boréale	Sapin baumier	TBE	Contraction prévue à la limite méridionale de l'aire de répartition en raison de taux de mortalité hivernale plus élevés ou d'une asynchronie hôte-parasite.

AUTEUR/ TYPE	SUPERFICIE	FORÊT / HÔTE	INTERACTION	COMMENTAIRES
Zhang et coll. 2014	La région boréale	Sapin baumier/ épinette	TBE	Prévision : le réchauffement climatique diminuera la mortalité des arbres induite par la TBE et la gravité des pullulations. La mortalité est liée aux années plus humides.
Observation	N.-B.	La région boréale	TBE	Le printemps chaud a provoqué l'effondrement des populations.
Tai et Carroll 2022	C.-B.	Douglas taxifolié	TOE	Prévision : expansion et contraction de l'aire de répartition : synchronie optimale à des latitudes et des altitudes plus élevées en raison du réchauffement climatique et divergence de la synchronie à des latitudes et des altitudes plus basses.
Observation	C.-B.	Pruche de l'Ouest	APO	Le dôme de chaleur a provoqué l'effondrement de la population d'arpenteuses de la pruche de l'Ouest.
Observation	T.N.-O.	Pin gris	IPA	Premier signalement dans les T.N.-O. en 2019.
Dudney et coll. 2021	Sierra Nevada	Pin à écorce blanche	RVPB	Expansion en altitude en raison de l'allongement de la période de végétation, limitée par la présence d'un autre hôte. Des conditions plus arides à des altitudes plus basses entraîneront une contraction de l'hôte et peut-être un déplacement de l'aire de répartition.
Pedlar et coll. 2020	Est du Canada	Chêne	Flétrissement du chêne	Prévision : les modèles indiquent que les conditions climatiques dans le sud de l'Ontario sont favorables à l'agent pathogène et à deux insectes vecteurs, et que ces conditions climatiques seront de plus en plus favorables au cours des deux prochaines décennies.
Hennon et coll. 2020	Canada-États-Unis	Douglas taxifolié	Rouille suisse des aiguilles	Prévision : l'augmentation des températures moyennes hivernales est à l'origine des pullulations.

AUTEUR/ TYPE	SUPERFICIE	FORÊT / HÔTE	INTERACTION	COMMENTAIRES
Hennon et coll. 2021	Canada-États-Unis	Pin tordu latifolié	Rouille de la tige du pin	Prévision : l'augmentation des températures nocturnes entraîne une augmentation de la fréquence des années d'infection.
Observation	Sask.	Conifères	Rouille des aiguilles	Prolifération de la rouille des aiguilles pendant les périodes d'humidité extrême.

PLP = puceron lanigère de la pruche; DD = dendroctone du Douglas; DPP = dendroctone du pin ponderosa; DE = dendroctone de l'épinette; SSO = scolyte du sapin de l'ouest; TBE = tordeuse des bourgeons de l'épinette; PCM = porte-case du mélèze; APO = arpenreuse de la pruche de l'Ouest; TOE = tordeuse occidentale de l'épinette; IPA = infection de pourridié-agaric; TNR = tache noire des racines; RVPB = rouille vésiculeuse du pin blanc.

Les observations proviennent de gestionnaires provinciaux ou territoriaux de la lutte contre les ravageurs forestiers.

## INCENDIE FORESTIER

Un examen récent des interactions entre les incendies forestiers et les perturbations suggère que les perturbations forestières n'augmentent pas la probabilité d'incendies (les conditions météorologiques étant souvent un facteur prépondérant), mais peuvent affecter le potentiel d'allumage et le comportement des incendies (Kane et coll. 2017). La perturbation que constituent les incendies forestiers n'a pas été explicitement définie comme une priorité en matière de connaissances par l'équipe de travail, car des travaux sont actuellement menés par d'autres groupes de travail du Conseil canadien des ministres des forêts. C'est pourquoi le présent document ne résume pas toutes les interactions entre les incendies et les ravageurs forestiers, mais seulement celles qui ont été présentées lors de l'atelier et qui concernent les scolytes, la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) et la tordeuse occidentale de l'épinette (TOE).

- Les données actuelles suggèrent que les pullulations de scolytes ont un effet minime sur la probabilité et la gravité des incendies, mais qu'elles peuvent exacerber le comportement du feu, particulièrement pendant la phase des aiguilles « rouges ». Cela tient en partie aux

- Les effets directs des incendies forestiers sur les scolytes, y compris les brûlages dirigés, varient en fonction de l'importance des dommages subis par les arbres et des populations locales de scolytes. À court terme, les scolytes attaquent les arbres blessés, ce qui provoque un regain d'activité (Fettig et coll., 2022).
- La TBE transforme les combustibles de surface et les combustibles étagés, la connectivité des combustibles et le potentiel d'allumage.

Deux modèles distincts de simulation du paysage sur 300 ans ont donné les résultats suivants :

- La TBE réduit le risque d'incendie forestier à long terme en agissant comme un agent d'éclaircissement naturel qui élimine périodiquement les combustibles étagés dans les forêts mixtes du Minnesota (Sturtevant et coll. 2012);
- La défoliation de la TBE n'a pas eu d'effet sur la taille des incendies, tandis que l'exploitation forestière a augmenté la taille des incendies par la conversion en conifères hôtes inflammables en début de cycle (James et coll. 2011);

- Le risque d'incendie est influencé par la saison et la chronologie des pullulations de la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Le printemps et la défoliation tardive (8 à 10 ans) augmentent le risque, tandis que l'été et la défoliation actuelle le diminuent (James et coll. 2017, Stocks, 1987).
- Dans une simulation de la végétation produite par la TBE, Sato et coll. (2022 en cours de révision) ont signalé une augmentation du combustible et de la taille des incendies qui s'épuise après une pullulation, de sorte que l'augmentation induite par la TBE est mineure sur de plus longues périodes de temps.
- Les pratiques d'atténuation des incendies se sont avérées accroître l'impact des défoliateurs en raison de l'augmentation des espèces d'arbres hôtes intolérants à l'ombre (Fettig et coll. 2022).
- Les pullulations de TOE dans le nord-ouest du Pacifique ont entraîné une diminution du risque d'incendie sans incidence sur la gravité des brûlures (Meigs et coll. 2016).

## LACUNES DE CONNAISSANCES

Les discussions de l'atelier n'ont pas porté sur les besoins en matière de recherche. C'est pourquoi la section suivante résume les lacunes en matière de connaissances relevées dans des articles évalués par des pairs pour chacun des facteurs de stress abiotiques, la sécheresse, les tempêtes violentes, le réchauffement climatique et les phénomènes météorologiques extrêmes.

## SÉCHERESSE

À la lumière des éléments fournis dans le tableau 2, la plus grande partie des études empiriques ou expérimentales portent sur les interactions entre la sécheresse et une perturbation biotique, principalement les scolytes, et très peu d'études portent sur les interactions composées, transnationales ou en cascade. Les maladies forestières ne sont que très peu représentées, avec seulement quelques études sur la rouille vésiculeuse du pin blanc, la brûlure des perchis du pin argenté, le faux-gui, les infections de

pourridié-agaric et la maladie des taches noires des racines. La plupart des études sur les maladies des forêts étaient de nature prévisionnelle. Certaines études empiriques ont noté l'amplification de la mortalité liée à la sécheresse, notamment le tremble défolié par la livrée des forêts ou la mineuse serpentine et le complexe incendie-dégel-inondation du pergélisol dans les zones de pergélisol

Plusieurs grands thèmes se sont dégagés de l'examen des lacunes de connaissances liées à la sécheresse ou des besoins de recherche définis dans la documentation. En ce qui concerne l'hôte, il s'agit notamment des seuils physiologiques et de leurs effets sur les arbres, des mécanismes de mortalité des arbres et des tendances régionales en matière de mortalité. Pour ce qui est des ravageurs, il s'agit notamment de la réaction des ravageurs forestiers au stress hydrique induit par la sécheresse sur les arbres et, sur le plan systémique, de la régulation descendante des ravageurs forestiers par des espèces parasitoïdes, prédatrices ou antagonistes, des mécanismes de rétroaction et des impacts, ainsi que des effets sur les régimes de ravageurs forestiers et les facteurs climatiques ou de perturbation concomitants. Les besoins précis en matière de recherche sont les suivants:

- Déclin du cèdre jaune : des recherches supplémentaires sont nécessaires concernant les facteurs de déclin à petite échelle (Comeau et Daniels, 2022).
- Déclin du tremble : il est nécessaire de quantifier l'importance relative de plusieurs facteurs dans la dynamique des populations d'arbres et d'évaluer si les interactions entre plusieurs facteurs jouent un rôle important dans la prévision de la dynamique forestière (Refsland et Cushman 2021).
- Les recherches sur le puceron lanigère de la pruche menées aux États-Unis comprennent l'examen des effets directs de la sécheresse sur la survie des pruches pendant les infestations actives de pucerons (Kolb et coll. 2016). Nous ne savons pas avec certitude si ces effets sont préoccupants pour les forêts canadiennes.
- Scolytes : les recherches futures envisagées pour les États-Unis sont (1) le rôle de la température dans les

pullulations de scolytes induites par la sécheresse; (2) la détermination des espèces de scolytes capables d'autoentretenir les pullulations une fois la sécheresse passée; (3) le degré de mortalité des arbres associé à la sécheresse qui se produirait en l'absence d'infestation de scolytes; (4) l'efficacité de la manipulation de la composition et de la structure des forêts pour réduire le stress causé par la sécheresse et les infestations de scolytes; (5) la gravité de la sécheresse dans les forêts de pins de l'est des États-Unis qui ferait passer le rôle de la sécheresse dans les pullulations de scolytes du sud du pin d'un facteur négatif à un facteur positif; (6) l'intégration de modèles mécanistes de réaction des scolytes à la sécheresse et à la température dans des modèles qui prévoient les effets du climat sur la végétation forestière (Kolb et coll. 2016).

- Pathogènes fongiques : des données empiriques et des outils de prévision sont nécessaires pour déterminer comment les changements de fréquence et de gravité des sécheresses affecteront les pathogènes fongiques (Kolb et coll., 2016).
- Faux-gui : recherche comparant les impacts d'une sécheresse intense sur les faux-guis et leurs arbres hôtes (Kolb et coll. 2016).
- Infection de pourridié-agaric : recherche sur la manière dont la résistance aux maladies biotiques ou la tolérance à l'infection de pourridié est liée à la tolérance à la sécheresse ou à la qualité des produits du bois (Cruikshank et Filipescu, 2017).
- Général : les effets croisés de la sécheresse à l'échelle du peuplement et du paysage (Clark et coll. 2016).

## TEMPÊTES VIOLENTES

Peu de travaux ont été réalisés sur les tempêtes violentes, à l'exception de quelques études concernant la tempête de verglas de 1998 dans l'est du Canada. Toutefois, les séquelles des tempêtes violentes peuvent déclencher d'autres perturbations, notamment des ravageurs forestiers qui s'attaquent aux arbres stressés ou abattus ou qui augmentent le risque d'incendie forestier. Il est intéressant de noter que les études empiriques sur les

dommages causés par la glace et la neige étaient parmi les rares à inclure l'intégrité de la forêt, l'effet de lisière ou la fragmentation en tant que variable qui influence les dommages causés à la forêt.

Vogt (2020) a relevé les lacunes suivantes dans les connaissances relatives aux perturbations météorologiques dans le sud des États-Unis.

- Quels sont les effets en cascade des perturbations combinées (en fonction de leur degré de gravité) sur les composantes abiotiques et biotiques de l'écosystème?
- Comment les populations et les communautés d'insectes perceurs de bois et d'autres insectes colonisateurs tardifs des arbres évoluent-elles au fil du temps?
- Le degré de perturbation entraîne-t-il des taux différents de mortalité résiduelle des arbres et des réactions différentes des insectes et des pathogènes fongiques?
- Les espèces non indigènes envahissantes seraient-elles plus actives dans les zones perturbées par les conditions météorologiques? Quels sont les biomes forestiers les plus exposés au risque d'invasion par des espèces non indigènes à la suite de violentes tempêtes?
- Le moment et le type d'activités de gestion des perturbations post-météorologiques ont-ils une incidence sur les communautés biotiques et la dynamique de la régénération?

## RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES

Des études menées sur les interactions biotiques avec le réchauffement climatique et les phénomènes météorologiques extrêmes (tableau 3) présentent des similitudes avec les études sur la sécheresse (tableau 2). La plupart d'entre elles traitent des interactions binaires liées, l'accent étant mis sur les scolytes, et très peu d'études portent sur les maladies forestières. La plupart des espèces de scolytes ont vu leur aire de répartition s'étendre, tant en latitude qu'en altitude, en raison du

réchauffement climatique et de l'évolution des taux de croissance. Seules deux études ont examiné les effets en cascade de multiples ravageurs forestiers, toutes deux dans des écosystèmes de haute altitude.

Les lacunes générales en matière de connaissances sont les mêmes que celles relevées pour la sécheresse, à savoir une meilleure compréhension des interactions entre les perturbations et de leurs rétroactions, ainsi que des effets directs et indirects du réchauffement climatique et des phénomènes météorologiques extrêmes sur les ravageurs, les hôtes et les ennemis naturels. Les lacunes de connaissances suivantes ont été relevées dans certaines des études empiriques mentionnées dans le tableau 3.

- Région boréale de l'Arctique : meilleure compréhension des déplacements de l'aire de répartition des insectes, des effets en cascade de la pluie sur la neige, des facteurs d'exposition et de sensibilité à la sécheresse (Foster et coll., 2022).
- Maladies forestières : déterminer comment les surfaces d'infection de l'hôte (c'est-à-dire les racines, les feuilles, les tissus de la tige) réagissent au réchauffement et au déficit hydrique à travers les gradients d'aridité (Dudney et coll. 2021).
- Maladies forestières : des recherches sont nécessaires pour déterminer les influences précises de la température et des précipitations et les limites physiologiques de l'hôte et du pathogène (Hennon et coll. 2021).
- Scolytus du sapin de l'ouest : les futures études devraient déterminer les points de surfusion spécifiques, la relation entre la température et le taux de croissance, et la manière dont la variabilité relativement élevée de l'âge et de la classe de taille du sapin subalpin au sein du peuplement affecte la dynamique d'irruption (Howe et coll., 2022).
- Tordeuse des bourgeons de l'épinette : des études à long terme sur plusieurs générations sont nécessaires pour déterminer si les dates d'émergence maximale des larves hivernantes pourraient changer en s'adaptant à la phénologie du débourrement de l'épinette noire (Pureswaran et coll. 2018; 2019).

- Général : caractérisation des mécanismes de résistance chez les survivants génétiques des perturbations (Six et coll. 2018).
- Général : la caractérisation des seuils des systèmes au-delà desquels les changements sont irréversibles sera un élément important de l'aménagement forestier dans un climat changeant (Bentz et coll. 2010).
- Général : mieux comprendre les effets de l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique sur les insectes et les maladies (Agne et coll. 2018).
- Général : des simulations basées sur des ensembles sont urgemment nécessaires pour réduire les incertitudes des prévisions et fournir une base solide pour orienter les stratégies d'aménagement forestier (Chaste et coll. 2019).

## IMPACTS DES PERTURBATIONS

Les discussions de l'atelier sur les impacts des perturbations ont permis de conclure qu'une bonne première étape consisterait à évaluer la pertinence des impacts existants recensés pour d'autres ravageurs importants dans les récentes analyses du risque phytosanitaire. Ainsi, les impacts ou les bénéfices ne sont pas décrits dans le présent rapport, mais figurent dans les évaluations du risque phytosanitaire (dendroctone du pin ponderosa) ou les analyses du risque phytosanitaire (agrile du frêne, longicorne brun de l'épinette) existantes (<https://www.ccmf.org/centre-de-connaissances/>). Une analyse du risque phytosanitaire pour la tordeuse des bourgeons de l'épinette, réalisée par le Service canadien des forêts de Ressources naturelles Canada, est à venir. Cette approche est limitée par le manque d'informations sur l'impact des pathogènes forestiers.

## AVANÇÉES CONCEPTUELLES ET MODÉLISATION DES INTERACTIONS ENTRE LES PERTURBATIONS

La capacité d'informer l'adaptation repose sur des preuves empiriques ou expérimentales combinées à des cadres de modèles avancés capables de simuler des interactions de perturbations complexes à plusieurs échelles. La section suivante résume brièvement la théorie et la pratique de la modélisation des interactions entre les perturbations, ainsi que certains des défis et des perspectives de ces efforts.

### THÉORIE ET PRATIQUE

Traditionnellement, les perturbations abiotiques et biotiques se caractérisent par leur gravité, leur étendue et leur fréquence dans les paysages. Cependant, différents processus agissant à différentes échelles peuvent agir en synergie pour amplifier les perturbations à toutes les échelles (Sturtevant et Fortin, 2021). Les interactions interéchelles modifient les relations modèle-processus entre les échelles, de sorte que les processus à échelle fine peuvent influencer une vaste étendue spatiale ou une longue période de temps, ou que les facteurs à grande échelle peuvent interagir avec les processus à échelle fine pour déterminer la dynamique du système (Peters et coll. 2007).

Ainsi, les progrès conceptuels dans l'étude des interactions entre les perturbations reconnaissent que les régimes de perturbation résultent de processus à travers les échelles temporelles et spatiales, ce qui entraîne une dynamique non linéaire entre les échelles, une incertitude inhérente et qu'ils sont influencés par les perturbations anthropogéniques. Le modèle conceptuel idéal pour l'étude des interactions entre les perturbations comprend les éléments suivants :

- 1) démêler les mécanismes et processus d'interaction des perturbations;
- 2) les éléments déterministes et stochastiques des perturbations anthropiques;

3) l'incertitude due au changement climatique à plusieurs échelles (Sturtevant et Fortin, 2021).

Les interactions entre les perturbations sont éclairées par des études empiriques ou expérimentales qui cherchent à mieux comprendre la dynamique des écosystèmes forestiers qui émerge des interactions entre de multiples perturbations, ainsi que des facteurs biophysiques et démographiques au sein des paysages forestiers (Sturtevant et Fortin, 2021). De nombreux cadres conceptuels ou modèles qui traitent des interactions entre les perturbations existent (Anderegg et coll. 2015, Cooke et Carroll 2017, Harmon et Bell 2020, Hennon et coll. 2020, Lewis et Lindgren 2000, Micheletti et coll. 2021, Raffa et coll. 2008, Wang et coll. 2012) et comprennent aussi bien l'examen d'un seul ravageur forestier que l'étude des systèmes de ravageurs forestiers.

### DÉFIS ET PERSPECTIVES

Les discussions de l'atelier ont reconnu la complexité des interactions entre les perturbations, y compris la possibilité d'une dynamique non linéaire, d'événements stochastiques, d'effets synergiques et de rétroactions réciproques. Cependant, force est de constater que les modèles existants ne permettent pas d'éclairer les décisions d'aménagement forestier en ce qui concerne les interactions entre les perturbations et leurs impacts. Une étude récente de Sturtevant et Fortin (2021) a révélé que, bien que la tendance émergente soit à une modélisation plus explicite des processus de perturbation et de leurs effets émergents sur la dynamique du système et la structure du paysage, les modèles statiques des régimes de perturbation basés sur des statistiques, par exemple ceux qui sont axés sur la réaction du système plutôt que sur la rétroaction sur le système, sont encore couramment appliqués. La modélisation de l'interaction entre les perturbations est donc limitée par le manque d'études empiriques qui incluent un comportement de seuil non linéaire, des interactions entre les échelles et un moyen de réduire l'incertitude.

Pour combler cette lacune, Sturtevant et Fortin (2021) suggèrent que 1) les études empiriques sur les interactions entre les perturbations définissent explicitement la nature et la forme des interactions et que 2) les modèles saisissent la direction et l'ampleur des processus d'interaction, y compris ceux qui transcendent les échelles spatio-temporelles. Raffa et coll. (2008) ont suggéré de prendre en compte les facteurs suivants dans une analyse transversale des ravageurs forestiers : la résistance et la tolérance des plantes à la forme d'alimentation de la guilde; le profil de réponse des herbivores végétaux au stress environnemental; le degré et la manière dont les ennemis naturels et les symbiotes exercent une rétroaction; et les effets des conditions météorologiques sur l'adéquation des plantes et la phénologie des insectes.

L'expérimentation, les avancées conceptuelles et les approches empiriques sont des moyens d'aborder les domaines d'incertitude, particulièrement en ce qui concerne les seuils. De cette manière, la réaction de l'écosystème peut être saisie par des études contrôlées axées sur les mécanismes d'interaction des perturbations, qui peuvent ensuite servir de base à l'estimation des paramètres du modèle. Déterminer les sources d'incertitude à l'intérieur ou à l'extérieur des modèles (Srivastava et coll. 2021) ou utiliser des modèles consensuels pourrait également contribuer à réduire l'incertitude (Boulanger et coll. 2022). Srivastava et coll. (2021) ont introduit le concept de « caractères de remplacement » pour gérer l'incertitude. Les caractères de remplacement sont définis comme des processus biologiques ou bioclimatiques qui présentent un degré élevé d'incertitude et qui ont un impact important sur notre capacité à remédier aux conséquences biotiques du changement climatique. Il s'agit essentiellement de surprises écologiques, mais qui s'étendent à toutes les couches biologiques, de l'organisme à l'écosystème, qui englobent des événements et des processus et qui invoquent explicitement la double condition d'une grande incertitude et d'un impact important sur le résultat.

Bien que l'atelier ait abordé plusieurs modèles (SpaDES[1], SELES[1] et LANDIS[1]), la plupart des discussions ont porté sur PERFICT[2], suite à la présentation du Dr Eliot McIntire sur le sujet. PERFICT, une fondation réimaginée pour l'écologie prédictive, est un outil qui pourrait permettre de relever certains des défis mentionnés. PERFICT part du principe que l'écologie a besoin d'un cadre qui permette la transférabilité de chaque composante du flux de travail de modélisation et qui rende les évaluations interétudes rapides et courantes, et suffisamment souples pour s'adapter aux besoins d'engagement en temps réel des intervenants (McIntire et coll. 2022). PERFICT repose sur sept principes qui facilitent la comparaison de modèles entre études, la vérification d'hypothèses et la modélisation d'ensemble, tout en favorisant l'utilité, la flexibilité, l'adaptabilité et la longévité scientifique (McIntire et coll., 2022).

Au cœur de l'approche PERFICT sont les modules propres à un processus, mais génériques à d'autres systèmes ou questions. Par exemple, un module peut être basé sur des informations provenant d'un article évalué par des pairs, tandis qu'un autre peut être basé sur une étude différente. Pour déterminer quel ensemble de données est pertinent ou important, les ensembles de données sont traités par une chaîne de validation. La souplesse des modules réutilisables et interopérables permet à la science de répondre rapidement à l'évolution des exigences politiques (McIntire et coll. 2022). Les avantages sont nombreux, notamment la possibilité d'examiner l'incertitude en comparant les résultats de divers modèles et de déterminer les possibilités de modèles consensuels, ce qui peut réduire davantage l'incertitude (Boulanger et coll., 2022).

## DISCUSSION

Les résultats de cette synthèse des connaissances sont prometteurs en ce qui concerne les avancées conceptuelles dans la modélisation de l'interaction des perturbations et l'existence d'une plateforme, par exemple PERFICT, qui facilitera l'évaluation, la comparaison et

[1] SpaDES : Spatial Discrete Event Simulation; SELES : Spatially Explicit Landscape Event Simulator; LANDIS : modèle de perturbation et de succession des paysages forestiers. [2] PERFICT repose sur sept principes appliqués à la modélisation écologique : réaliser des prévisions fréquentes, évaluer les modèles, rendre les modèles réutilisables, librement accessibles et interopérables, construits dans le cadre de flux de travail continus régulièrement mis à l'essai (PERFICT).

l'amélioration des modèles. Cela contribuera non seulement à réduire l'incertitude, mais permettra également à la science de réagir rapidement et de s'adapter à l'évolution des exigences politiques. Toutefois, des lacunes importantes subsistent dans les connaissances, notamment en ce qui concerne les effets physiologiques du changement climatique sur les arbres et les ravageurs, en particulier les pathogènes forestiers et les ravageurs mineurs, ainsi que la dynamique des interactions spatio-temporelles des perturbations, qui peuvent entraîner des changements non linéaires dans la structure et la fonction des écosystèmes. Il faut donc mener des recherches approfondies et holistiques sur les principaux modèles biologiques, où les données empiriques sur les interactions entre les espèces dans diverses conditions climatiques alimenteraient les modèles basés sur les processus (Jactel et coll. 2019). Des recherches supplémentaires sont également nécessaires pour étudier les effets de la fragmentation des forêts sur les perturbations forestières et pour déterminer le degré d'intégrité requis pour garantir la résilience, comme en témoigne le manque d'éléments probants à cet égard. Les nouvelles technologies et plateformes, telles que les données obtenues à l'aide de satellites ou de la technologie LiDAR (Laser imaging, Detection, and Ranging), représentent des possibilités significatives pour mieux calibrer des modèles de simulation spatialement explicites (Canelles et coll. 2021).

En l'absence de mesures d'adaptation propres au système, l'aménagement pourrait s'appuyer sur les projections existantes et s'appliquer à une partie des terres. Cela pourrait être particulièrement pertinent pour les forêts boréales méridionales, qui devraient évoluer de forêts dominées par des conifères vers des forêts plus tempérées dominées par des feuillus (Chaste et coll. 2019, Frelich et coll. 2021). En ce qui concerne l'adaptation au dendroctone du pin ponderosa, Sambaraju et coll. (2019) suggèrent que les aménagistes forestiers se servent des projections de phénomènes météorologiques extrêmes (par exemple, sécheresses prolongées) comme guides pour prendre des décisions de reboisement ou planter des arbres adaptés à

la chaleur dans de nouveaux environnements par migration assistée. Indépendamment des mesures d'adaptation fondées sur la modélisation, les survivants génétiques des perturbations représenteront l'un de nos meilleurs informateurs sur l'adaptation aux changements climatiques et nous devrions nous efforcer de mieux comprendre comment ils parviennent à s'adapter.

Les événements extrêmes et la variabilité du climat pourraient affecter les écosystèmes dans une plus large mesure que les tendances moyennes du climat. La réaction graduelle des espèces au réchauffement directionnel du climat risque d'être éclipsée par les transitions abruptes déclenchées par les interactions entre les conditions météorologiques et les perturbations (Boiffin et coll. 2013). Des facteurs de stress multiples ou des perturbations composées, par exemple des événements extrêmes suivis de perturbations biotiques ou inversement, influenceront la dynamique des écosystèmes de telle sorte que la résilience sera mise à l'épreuve, ce qui pourrait entraîner une inadaptation climatique accélérée (Nolet et Kneeshaw, 2018). Les surprises écologiques auront probablement l'impact le plus important et représentent les événements qui posent le plus de problèmes d'adaptation, car il s'agit en effet de surprises, de franchissements de seuils imprévus. Aujourd'hui encore, les principaux ravageurs connus adoptent des comportements qui sortent des schémas prévus ou connus. Les surprises écologiques peuvent inclure les ravageurs secondaires ou ceux qui sont actuellement considérés comme inoffensifs. Par conséquent, les chercheurs et les aménagistes forestiers ont tout intérêt à reconnaître que l'effet à long terme de la dynamique forestière actuelle et des politiques d'aménagement se prolongera encore longtemps dans l'avenir. À l'échelle locale, les aménagistes devraient accorder une attention particulière aux ravageurs forestiers actuels et à ceux qui pourraient avoir des impacts futurs (Canelles et coll. 2021). Aujourd'hui plus que jamais, des efforts de collaboration entre tous les aspects de l'aménagement forestier, par exemple la santé des forêts, la recherche forestière, la croissance et le rendement, et la gestion des incendies, sont nécessaires

pour garantir que les mesures d'adaptation tiennent compte de la complexité des interactions entre les perturbations prévues à l'avenir.

## RÉSUMÉ

Les interactions entre les perturbations peuvent entraîner des changements importants, non linéaires ou inattendus dans la structure et la fonction des écosystèmes. Trouver des éléments communs à ces événements complexes est une première étape importante pour prédire leur occurrence et comprendre leur importance (Buma, 2015). Compte tenu des lacunes de connaissances et du temps nécessaire pour combler ces lacunes, il est nécessaire d'adopter plusieurs approches pour combler ces lacunes. La première pourrait consister à définir une réponse collaborative et coordonnée en matière de recherche qui examinerait, hiérarchiserait et comblerait les lacunes en matière de connaissances relevées dans le présent rapport. La seconde pourrait consister à évaluer la transférabilité d'autres systèmes bien étudiés et à les appliquer à des taxons ou à des guildes alimentaires similaires. Des plateformes telles que PERFICT pourraient faciliter leur réalisation en temps opportun. Sturtevant et Fortin (2021) ont conclu que la compréhension conceptuelle, l'étude empirique et la modélisation de simulation doivent continuellement se renforcer mutuellement si nous voulons démêler les complexités des interactions des perturbations dans le temps et l'espace. La clarté des concepts (connaissance), une base empirique (données et analyse) et la conception de modèles (synthèse et logiciel) permettront à terme de mieux comprendre les systèmes complexes, mais le choix des processus à modéliser explicitement et de ceux à agréger demeure le défi fondamental de notre époque.

## PROCHAINES ÉTAPES PROPOSÉES POUR 2023-2024

Les ateliers de synthèse des connaissances 2022 ont fourni un aperçu de l'état des connaissances sur les interactions entre les perturbations forestières et les outils de modélisation existants pour évaluer et prévoir ces interactions. Le GTRF propose un exercice de suivi en 2023-2024 qui implique des échanges entre les experts en santé des forêts et en aménagement forestier sur les lacunes de connaissances, les incertitudes et les besoins d'information, qui pourraient être adaptés à des régions particulières du Canada. L'objectif principal est de favoriser les dialogues régionaux qui facilitent les échanges entre les experts scientifiques et les praticiens sur les implications des interactions des perturbations sur la résilience future des forêts et la planification de l'aménagement, ainsi que sur les mesures à prendre pour hiérarchiser et combler les principales lacunes et incertitudes en matière de connaissances.

## RÉFÉRENCES

### OUVRAGES CITÉS

- Agne, M. C., Beedlow, P. A., Shaw, D. C., Woodruff, D. R., Lee, E. H., Cline, S. P. et Comeleo, R. L. (2018). Interactions of predominant insects and diseases with climate change in Douglas-fir forests of western Oregon and Washington, USA. *Forest Ecology and Management*, 409, 317 à 332. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.004>.
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A. et Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660 à 684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>.

- Anderegg, W. R. L., Hicke, J. A., Fisher, R. A., Allen, C. D., Aukema, J., Bentz, B., Hood, S., Lichstein, J. W., Macalady, A. K., McDowell, N., Pan, Y., Raffa, K., Sala, A., Shaw, J. D., Stephenson, N. L., Tague, C. et Zeppel, M. (2015). Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *The New Phytologist*, 208(3), 674 à 683. <https://doi.org/10.1111/nph.13477>.
- Alberta Forest Health and Adaptation. (2019). Annual Report 2019: Forest Health and Adaptation in Alberta. <https://open.alberta.ca/dataset/ddea0958-0cd4-49b1-9947-053065817202/resource/c01f8cdb-7a73-45a9-882c-949c6cb92fba/download/af-forest-health-adaptation-annual-report-2019.pdf>
- Anoszko, E., Frelich, L. E., Rich, R. L. et Reich, P. B. (2022). Wind and fire: Rapid shifts in tree community composition following multiple disturbances in the southern boreal forest. *Ecosphere* (Washington, D.C.), 13(3), s.o. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3952>.
- Aubin, I., Boisvert-Marsh, L., Kebli, H., McKenney, D., Pedlar, J., Lawrence, K., Hogg, E. H., Boulanger, Y., Gauthier, S. et Ste-Marie, C. (2018). Tree vulnerability to climate change: Improving exposure-based assessments using traits as indicators of sensitivity. *Ecosphere* (Washington, D.C.), 9(2), e02108, s.o. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2108>.
- Aukema, B. H., Carroll, A. L., Zheng, Y., Zhu, J., Raffa, K. F., Dan Moore, R., Stahl, K. et Taylor, S. W. (2008). Movement of outbreak populations of mountain pine beetle: Influences of spatiotemporal patterns and climate. *Ecography* (Copenhague), 31(3), 348 à 358.
- Balducci, L., Fierravanti, A., Rossi, S., Delzon, S., De Grandpré, L., Kneeshaw, D. D. et Deslauriers, A. (2020). The paradox of defoliation: Declining tree water status with increasing soil water content. *Agricultural and Forest Meteorology*, 290, 108025. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108025>.
- Bellemin-Noël, B., Bourassa, S., Despland, E., De Grandpré, L. et Pureswaran, D. S. (2021). Improved performance of the eastern spruce budworm on black spruce as warming temperatures disrupt phenological defences. *Global Change Biology*, 27(14), 3358–3366. <https://doi.org/10.1111/gcb.15643>.
- Bentz, B. J., Duncan, J. P. et Powell, J. A. (2016). Elevational shifts in thermal suitability for mountain pine beetle population growth in a changing climate. *Forestry* (London), 89(3), 271 à 283. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpv054>.
- Bentz, B. J., Régnière, J., Fettig, C. J., Hansen, E. M., Hayes, J. L., Hicke, J. A., Kelsey, R. G., Negrón, J. F. et Seybold, S. J. (2010). Climate change and bark beetles of the western United States and Canada: Direct and indirect effects. *Bioscience*, 60(8), 602 à 613. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.8.6>.
- Bentz, B., Vandygriff, J., Jensen, C., Coleman, T., Maloney, P., Smith, S., Grady, A. et Schen-Langenheim, G. (2014). Mountain pine beetle voltinism and life history characteristics across latitudinal and elevational gradients in the western United States. *Forest Science*, 60(3), 434 à 449. <https://doi.org/10.5849/forsci.13-056>.
- Bigler, C., Gavin, D. G., Gunning, C. et Veblen, T. T. (2017). Drought induces lagged tree mortality in a subalpine forest in the Rocky Mountains. *Oikos* 116, 1983 à 1994.
- Bleiker, K. P., Conseil canadien des ministres des forêts et Collection de livres électroniques du gouvernement canadien. (2019). Évaluation de la menace que pose le dendroctone du pin ponderosa pour les pinèdes de la zone boréale et de l'Est du Canada. Canadian Council of Forest Ministers = Conseil canadien des ministres des forêts.
- Boiffin, J. et Munson, A. D. (2013). Three large fire years threaten resilience of closed crown black spruce forests in eastern Canada. *Ecosphere* (Washington, D.C.), 4(5), art56-20. <https://doi.org/10.1890/ES13-00038.1>

- Bouchard, M., Pothier, D. et Ruel, J. (2009). Stand-replacing windthrow in the boreal forests of eastern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(2), 481 à 487. <https://doi.org/10.1139/X08-174>.
- Boulanger, Y. et Pascual Puigdevall, J. (2021). Boreal forests will be more severely affected by projected anthropogenic climate forcing than mixedwood and northern hardwood forests in eastern Canada. *Landscape Ecology*, 36(6), 1725 à 1740. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01241-7>.
- Boulanger, Y., Pascual, J., Bouchard, M., D'Orangeville, L., Périé, C. et Girardin, M. P. (2022). Multi-model projections of tree species performance in Quebec, Canada under future climate change. *Global Change Biology*, 28(5), 1884 à 1902. <https://doi.org/10.1111/gcb.16014>.
- Boulanger, Y., Pascual, J., Bouchard, M., D'Orangeville, L., Périé, C. et Girardin, M. P. (2022). Multi-model projections of tree species performance in Quebec, Canada under future climate change. *Global Change Biology*, 28(5), 1884 à 1902. <https://doi.org/10.1111/gcb.16014>.
- Brecka, A. F. J., Boulanger, Y., Searle, E. B., Taylor, A. R., Price, D. T., Zhu, Y., Shahi, C. et Chen, H. Y. H. (2020). Sustainability of Canada's forestry sector may be compromised by impending climate change. *Forest Ecology and Management*, 474, 118352. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118352>.
- Buma, B. (2015). Disturbance interactions: Characterization, prediction, and the potential for cascading effects. *Ecosphere* (Washington, D.C.), 6(4), art70-15. <https://doi.org/10.1890/ES15-00058.1>.
- Burton, P. J. et Boulanger, Y. (2018). Characterizing combined fire and insect outbreak disturbance regimes in British Columbia, Canada. *Landscape Ecology*, 33(11), 1997 à 2011. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0710-4>.
- Burton, P. J., Jentsch, A. et Walker, L. R. (2020). The ecology of disturbance interactions. *Bioscience*, 70(10), 854 à 870. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa088>.
- Canelles, Q., Aquilué, N., James, P. M. A., Lawler, J. et Brotons, L. (2021). Global review on interactions between insect pests and other forest disturbances. *Landscape Ecology*, 36(4), 945 à 972. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01209-7>.
- Chandler, J. L., Elkinton, J. S. et Orwig, D. A. (2022). High rainfall may induce fungal attack of hemlock woolly adelgid (hemiptera: Adelgidae) leading to regional decline. *Environmental Entomology*, 51(1), 286 à 293. <https://doi.org/10.1093/ee/nvab125>.
- Chaste, E., Girardin, M. P., Kaplan, J. O., Bergeron, Y. et Hély, C. (2019). Increases in heat-induced tree mortality could drive reductions of biomass resources in Canada's managed boreal forest. *Landscape Ecology*, 34(2), 403 à 426. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00780-4>.
- Chen, L., Huang, J., Alam, S. A., Zhai, L., Dawson, A., Stadt, K. J. et Comeau, P. G. (2017). Drought causes reduced growth of trembling aspen in western Canada. *Global Change Biology*, 23(7), 2887 à 2902. <https://doi.org/10.1111/gcb.13595>.
- Chen, L., Huang, J., Dawson, A., Zhai, L., Stadt, K. J., Comeau, P. G. et Whitehouse, C. (2018). Contributions of insects and droughts to growth decline of trembling aspen mixed boreal forest of western Canada. *Global Change Biology*, 24(2), 655 à 667. <https://doi.org/10.1111/gcb.13855>.
- Clark, J. S., Iverson, L., Woodall, C. W., Allen, C. D., Bell, D. M., Bragg, D. C., D'Amato, A. W., Davis, F. W., Hersh, M. H., Ibanez, I., Jackson, S. T., Matthews, S., Pederson, N., Peters, M., Schwartz, M. W., Waring, K. M. et Zimmermann, N. E. (2016). The impacts of increasing drought on forest dynamics, structure, and biodiversity in the United States. *Global Change Biology*, 22(7), 2329 à 2352. <https://doi.org/10.1111/gcb.13160>.

- Comeau, V. M. et Daniels, L. D. (2022). Multiple divergent patterns in yellow-cedar growth driven by anthropogenic climate change. *Climatic Change*, 170 (3 à 4) <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03264-0>.
- Comeau, V. M., Daniels, L. D. et Zeglen, S. (2021). Climate-induced yellow-cedar decline on the island archipelago of Haida Gwaii. *Ecosphere* (Washington, D.C.), 12(3), s.o. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3427>.
- Comeau, V. M., Daniels, L. D., Knochenmus, G., Chavardès, R. D. et Zeglen, S. (2019). Tree-rings reveal accelerated yellow-cedar decline with changes to winter climate after 1980. *Forests*, 10(12), 1085. <https://doi.org/10.3390/f10121085>.
- Cooke, B. J. et Carroll, A. L. (2017). Predicting the risk of mountain pine beetle spread to eastern pine forests: Considering uncertainty in uncertain times. *Forest Ecology and Management*, 396, 11 à 25. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.008>.
- Cooke, B. J. et Roland, J. (2007). Trembling aspen responses to drought and defoliation by forest tent caterpillar and reconstruction of recent outbreaks in Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(9), 1586 à 1598. <https://doi.org/10.1139/X07-015>.
- Cruickshank, M. G. et Filipescu, C. N. (2017). The interactive effect of root disease and climate on wood properties in halfsibling Douglas-fir families. *Forest Ecology and Management*, 392, 58 à 67. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.03.002>.
- Currano, E. D., Wilf, P., Wing, S. L., Labandeira, C. C., Lovelock, E. C. et Royer, D. L. (2008). Sharply increased insect herbivory during the paleocene-eocene thermal maximum. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6), 1960 à 1964. <https://doi.org/10.1073/pnas.0708646105>.
- De Grandpré, L., Kneeshaw, D. D., Perigon, S., Boucher, D., Marchand, M., Pureswaran, D., Girardin, M. P. et Chen, H. (2019). Adverse climatic periods precede and amplify defoliator-induced tree mortality in eastern boreal North America. *The Journal of Ecology*, 107(1), 452 à 467. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13012>.
- De Grandpré, L., Marchand, M., Kneeshaw, D. D., Paré, D., Boucher, D., Bourassa, S., Gervais, D., Simard, M., Griffin, J. M. et Pureswaran, D. S. (2022). Defoliation-induced changes in foliage quality may trigger broad-scale insect outbreaks. *Communications Biology*, 5(1), 463 à 463. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03407-8>.
- Delisle, J., Bernier-Cardou, M. et Labrecque, A. (2019). Extreme cold weather causes the collapse of a population of *lambdina fiscellaria* (Lepidoptera: Geometridae) in the Laurentian mountains of Québec, Canada. *Canadian Entomologist*, 151(3), 311 à 328. <https://doi.org/10.4039/tce.2019.8>.
- Deschênes, É., Brice, M. et Brisson, J. (2019). Long-term impact of a major ice storm on tree mortality in an old-growth forest. *Forest Ecology and Management*, 448, 386 à 394. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.06.018>.
- Dooley, E. M. et Six, D. L. (2015). Severe white pine blister rust infection in whitebark pine alters mountain pine beetle (Coleoptera: Curculionidae) attack density, emergence rate, and body size. *Environmental Entomology*, 44(5), 1384 à 1394. <https://doi.org/10.1093/ee/nvv107>.
- Dudney, J., Willing, C. E., Das, A. J., Latimer, A. M., Nesmith, J. C. B. et Battles, J. J. (2021). Nonlinear shifts in infectious rust disease due to climate change. *Natural Communications*, 12(1), 5102 à 5102. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25182-6>.
- Dupont, A., Bélanger, L. et Bousquet, J. (1991). Relationships between balsam fir vulnerability to spruce budworm and ecological site conditions of fir stands in central Quebec.

Canadian Journal of Forest Research, 21(12), 1752 à 1759.  
<https://doi.org/10.1139/x91-242>.

Erbilgin, N., Zanganeh, L., Klutsch, J. G., Chen, S., Zhao, S., Ishangulyyeva, G., Burr, S. J., Gaylord, M., Hofstetter, R., Keefover-Ring, K., Raffa, K. F. et Kolb, T. (2021). Combined drought and bark beetle attacks deplete non-structural carbohydrates and promote death of mature pine trees. *Plant, Cell and Environment*, 44(12), 3636 à 3651.  
<https://doi.org/10.1111/pce.14197>.

Fettig, C. J., Runyon, J. B., Homicz, C. S., James, P. M. A. et Ulyshen, M. D. (2022). Fire and insect interactions in North American forests. *Current Forestry Reports*, 8(4), 301 à 316.  
<https://doi.org/10.1007/s40725-022-00170-1>.

Filbee-Dexter, K., Pittman, J., Haig, H. A., Alexander, S. M., Symons, C. C. et Burke, M. J. (2017). Ecological surprise: Concept, synthesis, and social dimensions. *Ecosphere* (Washington, D.C.), 8(12), s.o.  
<https://doi.org/10.1002/ecs2.2005>.

Flower, A., Gavin, D. G., Heyerdahl, E. K., Parsons, R. A. et Cohn, G. M. (2014). Drought-triggered western spruce budworm outbreaks in the interior Pacific Northwest: A multi-century dendrochronological record. *Forest Ecology and Management*, 324, 16 à 27.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.042>.

Foster, A. C., Wang, J. A., Frost, G. V., Davidson, S. J., Hoy, E., Turner, K. W., Sonnentag, O., Epstein, H., Berner, L. T., Armstrong, A. H., Kang, M., Rogers, B. M., Campbell, E., Miner, K. R., Orndahl, K. M., Bourgeau-Chavez, L. L., Lutz, D. A., French, N., Chen, D., Du, J., Shetakova, A. A., Shuman, J. K., Tape, K., Virkkala, A., Potter, C. et Goetz, S. (2022). Disturbances in North American boreal forest and arctic tundra: Impacts, interactions, and responses. *Environmental Research Letters*, 17(11), 113001.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac98d7>.

Frelich, L. E., Montgomery, R. A. et Reich, P. B. (2021). Seven ways a warming climate can kill the southern boreal forest. *Forests*, 12(5), 560. <https://doi.org/10.3390/f12050560>.

Garbutt, R. et publications canadiennes jusqu'en 2013. (2006). Spruce beetle and the forests of the southwest Yukon. Centre de foresterie du Pacifique.

Girardin, M. P., Guo, X. J., Gervais, D., Metsaranta, J., Campbell, E. M., Arsenault, A., Isaac-Renton, M. et Hogg, E. H. (2022). Cold-season freeze frequency is a pervasive driver of subcontinental forest growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences—PNAS*, 119(18), e2117464119-e2117464119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2117464119>.

Harmon, M. E., et Bell, D. M. (2020). Mortality in forested ecosystems: Suggested conceptual advances. *Forests*, 11(5), 572. <https://doi.org/10.3390/f11050572>.

Hart, S. J., Veblen, T. T., Eisenhart, K. S., Jarvis, D. et Kulakowski, D. (2014). Drought induces spruce beetle (*Dendroctonus rufipennis*) outbreaks across northwestern Colorado. *Ecology* 95, 930 à 939 (2014).

Harvey, B. J., Andrus, R. A., Battaglia, M. A., Negrón, J. F., Orrego, A. et Veblen, T. T. (2021). Droughty times in mesic places: Factors associated with forest mortality vary by scale in a temperate subalpine region. *Ecosphere* (Washington, D.C.), 12(1), s.o.  
<https://doi.org/10.1002/ecs2.3318>.

Harvey, J. E., Axelson, J. N. et Smith, D. J. (2018). Disturbance–climate relationships between wildfire and western spruce budworm in interior British Columbia. *Ecosphere* (Washington, D.C.), 9(3), e02126, s.o.  
<https://doi.org/10.1002/ecs2.2126>.

Hennon, P. E., Frankel, S. J., Woods, A. J., Worrall, J. J., Norlander, D., Zambino, P. J., Warwell, M. V., Shaw, C. G. et Woodward, S. (2020). A framework to evaluate climate effects on forest tree diseases. *Forest Pathology = Journal de pathologie forestière = Zeitschrift Für Forstpathologie*, 50(6), s.o. <https://doi.org/10.1111/efp.12649>.

Hennon, P. E., Frankel, S. J., Woods, A. J., Worrall, J. J., Ramsfield, T. D., Zambino, P. J., Shaw, D. C., Ritóková, G.,

- Warwell, M. V., Norlander, D., Mulvey, R. L., Shaw, C. G. et Woodward, S. (2021). Applications of a conceptual framework to assess climate controls of forest tree diseases. *Forest Pathology = Journal de pathologie forestière = Zeitschrift Für Forstpathologie*, 51(6), s.o. <https://doi.org/10.1111/efp.12719>.
- Hennon, P. E., D'Amore, D. V., Schaberg, P. G., Wittwer, D. T. et Shanley, C. S. (2012). Shifting climate, altered niche, and a dynamic conservation strategy for yellow-cedar in the north pacific coastal rainforest. *Bioscience*, 62(2), 147 à 158. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.2.8>.
- Howe, M., Peng, L. et Carroll, A. (2022). Landscape predictions of western balsam bark beetle activity implicate warm temperatures, a longer growing season, and drought in widespread irruptions across British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 508, 120047. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120047>.
- Huberman, Y., Beckers, J., Brett, R., Castilla, G., Errington, R., Fraser-Reid, E. C., Goodsman, D., Hogg, E.H., Metsaranta, J., Neilson, E., Olesinski, J., Parisien, M.-A., Price, D., Ramsfield, T., Shaw, C., Thompson, D., Voicu, M.F., Whitman, E. et Edwards, J. 2022. The state of Northwest Territories forests in the wake of climate change: baseline conditions and observed changes to forest ecosystems. *Ressources naturelles Canada, Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton, Alberta. Inf. Rep.NOR-X-430*.
- Itter, M. S., D'Orangeville, L., Dawson, A., Kneeshaw, D., Duchesne, L., Finley, A. O. et Battipaglia, G. (2019). Boreal tree growth exhibits decadal-scale ecological memory to drought and insect defoliation, but no negative response to their interaction. *The Journal of Ecology*, 107(3), 1288 à 1301. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13087>.
- Jactel, H., Koricheva, J. et Castagnérol, B. (2019). Responses of forest insect pests to climate change: Not so simple. *Current Opinion in Insect Science*, 35, 103 à 108. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2019.07.010>.
- Jactel, H., Petit, J., Desprez-Loustau, M., Delzon, S., Piou, D., Battisti, A. et Koricheva, J. (2012). Drought effects on damage by forest insects and pathogens: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 18(1), 267 à 276. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02512.x>.
- James, P. M. A., Fortin, M.-J., Sturtevant, B. R., Fall, A. et Kneeshaw, D. (2011). Modelling spatial interactions among fire, spruce budworm, and logging in the boreal forest. *Ecosystems (New York)*, 14(1), 60 à 75. <https://doi.org/10.1007/s10021-010-9395-5>.
- James, P. M. A., Robert, L., Wotton, B. M., Martell, D. L. et Fleming, R. A. (2017). Lagged cumulative spruce budworm defoliation affects the risk of fire ignition in Ontario, Canada. *Ecological Applications*, 27(2), 532 à 544. <https://doi.org/10.1002/eap.1463>.
- Kane, J. M., Varner, J. M., Metz, M. R. et van Mantgem, P. J. (2017). Characterizing interactions between fire and other disturbances and their impacts on tree mortality in western U.S. forests. *Forest Ecology and Management*, 405, 188 à 199. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.037>.
- Kleinman, J. S., Goode, J. D., Fries, A. C. et Hart, J. L. 2019. Ecological consequences of compound disturbances in forest ecosystems: a systematic review. *Ecosphere* 10(11):e02962. [10.1002/ecs2.2962](https://doi.org/10.1002/ecs2.2962).
- Kolb, T. E., Fettig, C. J., Ayres, M. P., Bentz, B. J., Hicke, J. A., Mathiasen, R., Stewart, J. E. et Weed, A. S. (2016). Observed and anticipated impacts of drought on forest insects and diseases in the United States. *Forest Ecology and Management*, 380, 321 à 334. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.051>.
- Kolb, T., Keefover-Ring, K., Burr, S. J., Hofstetter, R., Gaylord, M. et Raffa, K. F. (2019). Drought-mediated changes in tree physiological processes weaken tree defenses to bark beetle attack. *Journal of Chemical Ecology*, 45(10), 888 à 900. <https://doi.org/10.1007/s10886-019-01105-0>.

- Koontz, M. J., Latimer, A. M., Mortenson, L. A., Fettig, C. J. et North, M. P. (2021). Cross-scale interaction of host tree size and climatic water deficit governs bark beetle-induced tree mortality. *Nature Communications*, 12(1), 129 à 13. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20455-y>.
- Lalande, B. M., Hughes, K., Jacobi, W. R., Tinkham, W. T., Reich, R. et Stewart, J. E. (2020). Subalpine fir mortality in Colorado is associated with stand density, warming climates and interactions among fungal diseases and the western balsam bark beetle. *Forest Ecology and Management*, 466, 118133. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118133>.
- Lewis, K. J. et Lindgren, B. S. (2000). Conceptual model of biotic disturbance ecology in the central interior of B.C.: How forest management can turn Dr. Jekyll into Mr. Hyde. *Forestry Chronicle*, 76(3), 433 à 443. <https://doi.org/10.5558/tfc76433-3>.
- Li, F., Dudley, T. L., Chen, B., Chang, X., Liang, L. et Peng, S. (2016). Responses of tree and insect herbivores to elevated nitrogen inputs: A meta-analysis. *Acta Oecologica (Montrouge)*, 77, 160 à 167. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2016.10.008>.
- Lloren, J. I., Fahrig, L., Bennett, J. R., Contreras, T. A., McCune, J. L. et Chen, H. (2020). The influence of landscape context on short- and long-term forest change following a severe ice storm. *The Journal of Ecology*, 108(1), 224 à 238. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13255>.
- Maclauchlan, L. E., Stock, A. J. et Brooks, J. E. (2023). Infestation phases and impacts of dryocoetes confusus in subalpine fir forests of southern british columbia. *Forests*, 14(2), 363. <https://doi.org/10.3390/f14020363>.
- Maclauchlan, L. E. et Brooks, J. E. (2020). The balsam bark weevil, *Pissodes striatulus* (Coleoptera: Curculionidae): Life history and occurrence in southern British Columbia. *Journal of the Entomological Society of British Columbia*, 117, 3 à 19.
- MacQuarrie, C. J. K., Cooke, B. J. et Saint-Amant, R. (2019). The predicted effect of the polar vortex of 2019 on winter survival of emerald ash borer and mountain pine beetle. *Canadian Journal of Forest Research*, 49(9), 1165 à 1172. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0115>.
- McIntire, E. J. B., Chubaty, A. M., Cumming, S. G., Andison, D., Barros, C., Boisvenue, C., Haché, S., Luo, Y., Micheletti, T., Stewart, F. E. C. et Poisot, T. (2022). PERFICT: A Re-imagined foundation for predictive ecology. *Ecology Letters*, 25(6), 1345 à 1351. <https://doi.org/10.1111/ele.13994>.
- Meigs, G. W., Zald, H. S. J., Campbell, J. L., Keeton, W. S. et Kennedy, R. E. (2016). Do insect outbreaks reduce the severity of subsequent forest fires? *Environmental Research Letters*, 11(4), 45008 à 45017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/045008>.
- Michaelian, M., Hogg, E. H., Hall, R. J. et Arseneault, E. (2010). Massive mortality of aspen following severe drought along the southern edge of the Canadian boreal forest: Aspen mortality following severe drought. *Global Change Biology*, 17(6), 2084 à 2094. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02357.x>.
- Micheletti, T., Stewart, F. E. C., Cumming, S. G., Haché, S., Stralberg, D., Tremblay, J. A., Barros, C., Eddy, I. M. S., Chubaty, A. M., Leblond, M., Pankratz, R. F., Mahon, C. L., Van Wilgenburg, S. L., Bayne, E. M., Schmiegelow, F. et McIntire, E. J. B. (2021). Assessing pathways of climate change effects in SpaDES: An application to boreal landbirds of northwest territories Canada. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.679673>.
- Moise, E. R. D., Lavigne, M. B. et Johns, R. C. (2019). Density has more influence than drought on spruce budworm (*Choristoneura fumiferana*) performance under outbreak conditions. *Forest Ecology and Management*, 433, 170 à 175. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.031>.

- Nolet, P. et Kneeshaw, D. (2018). Extreme events and subtle ecological effects: Lessons from a long-term sugar maple–American beech comparison. *Ecosphere*, 9(7). doi:<https://doi.org/10.1002/ecs2.2336>.
- Pedlar, J. H., McKenney, D. W., Hope, E., Reed, S. et Sweeney, J. (2020). Assessing the climate suitability and potential economic impacts of oak wilt in Canada. *Scientific Reports*, 10(1), 19391. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75549-w>.
- Peng, C., Ma, Z., Lei, X., Zhu, Q., Chen, H., Wang, W., Liu, S., Li, W., Fang, X. et Zhou, X. (2011). A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests. *Nature Climate Change*, 1(9), 467 à 471. <https://doi.org/10.1038/nclimate1293>.
- Peters, D. P. C., Bestelmeyer, B. T. et Turner, M. G. (2007). Cross-scale interactions and changing pattern-process relationships: Consequences for system dynamics. *Ecosystems (New York)*, 10(5), 790 à 796. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9055-6>.
- Preisler, H. K., Hicke, J. A., Ager, A. A. et Hayes, J. L. (2012). Climate and weather influences on spatial temporal patterns of mountain pine beetle populations in Washington and Oregon. *Ecology (Durham)*, 93(11), 2421 à 2434. <https://doi.org/10.1890/11-1412.1>.
- Portalier, S. M. J., Candau, J. et Lutscher, F. (2022). A temperature-driven model of phenological mismatch provides insights into the potential impacts of climate change on consumer–resource interactions. *Ecography (Copenhagen)*, 2022(8), s.o. <https://doi.org/10.1111/ecog.06259>.
- Pureswaran, D. S., De Grandpré, L., Paré, D., Taylor, A., Barrette, M., Morin, H., Régnière, J. et Kneeshaw, D. D. (2015). Climate-induced changes in host tree-insect phenology may drive ecological state-shift in boreal forests. *Ecology (Durham)*, 96(6), 1480 à 1491. <https://doi.org/10.1890/13-2366.1>.
- Pureswaran, D. S., Neau, M., Marchand, M., De Grandpré, L. et Kneeshaw, D. (2019; 2018). Phenological synchrony between eastern spruce budworm and its host trees increases with warmer temperatures in the boreal forest. *Ecology and Evolution*, 9(1), 576 à 586. <https://doi.org/10.1002/ece3.4779>.
- Pureswaran, D. S., Roques, A. et Battisti, A. (2018). Forest insects and climate change. *Current Forestry Reports*, 4(2), 35 à 50. <https://doi.org/10.1007/s40725-018-0075-6>.
- Raffa, K. F., Aukema, B. H., Bentz, B. J., Carroll, A. L., Hicke, J. A., Turner, M. G. et Romme, W. H. (2008). Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: The dynamics of bark beetle eruptions. *Bioscience*, 58(6), 501 à 517. <https://doi.org/10.1641/B580607>.
- Refsland, T. K. et Cushman, J. H. (2021). Continent-wide synthesis of the long-term population dynamics of quaking aspen in the face of accelerating human impacts. *Oecologia*, 197(1), 25 à 42. <https://doi.org/10.1007/s00442-021-05013-7>.
- Régnière, J., St-Amant, R. et Duval, P. (2012). Predicting insect distributions under climate change from physiological responses: Spruce budworm as an example. *Biological Invasions*, 14(8), 1571 à 1586. <https://doi.org/10.1007/s10530-010-9918-1>.
- Robbins, Z. J., Xu, C., Aukema, B. H., Buotte, P. C., Chitra-Tarak, R., Fettig, C. J., Goulden, M. L., Goodsman, D. W., Hall, A. D., Koven, C. D., Kueppers, L. M., Madakumbura, G. D., Mortenson, L. A., Powell, J. A. et Scheller, R. M. (2022). Warming increased bark beetle-induced tree mortality by 30% during an extreme drought in California. *Global Change Biology*, 28(2), 509 à 523. <https://doi.org/10.1111/gcb.15927>.
- Ryall, K. L. et Smith, S. M. (2001). Bark and wood-boring beetle response in red pine (*Pinus resinosa* ait.) plantations damaged by the 1998 ice storm: Preliminary observations.

Forestry Chronicle, 77(4), 657 à 660.

<https://doi.org/10.5558/tfc77657-4>.

Ryall, K. L. et Smith, S. M. (2005). Patterns of damage and mortality in red pine plantations following a major ice storm. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(2), 487 à 493. <https://doi.org/10.1139/x04-180>.

Ryall, K. L., De Groot, P. et Smith, S. M. (2006). Sequential patterns of colonization of coarse woody debris by ips pini (say)(coleoptera: Scolytidae) following a major ice storm in Ontario. *Agricultural and Forest Entomology*, 8(2), 89 à 95. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9555.2006.00287.x>.

Sánchez-Pinillos, M., D'Orangeville, L., Boulanger, Y., Comeau, P., Wang, J., Taylor, A. R. et Kneeshaw, D. (2022). Sequential droughts: A silent trigger of boreal forest mortality. *Global Change Biology*, 28(2), 542 à 556. <https://doi.org/10.1111/gcb.15913>.

Sambaraju, K. R., Carroll, A. L. et Aukema, B. H. (2019). Multiyear weather anomalies associated with range shifts by the mountain pine beetle preceding large epidemics. *Forest Ecology and Management*, 438, 86 à 95. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.011>.

Sato, H., Chaste, E., Girardin M.P., Kaplan, J.O., Hely C., Candau, J.N. et Mayor, S.J. (2022), Dynamically simulating spruce budworm in eastern Canada and its interactions with wildfire (en cours de révision dans *Ecological Modelling*).

Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M. J., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T. A. et Reyer, C. P. O. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7(6), 395 à 402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>.

Six, D. L., Vergobbi, C. et Cutter, M. (2018). Are survivors different? genetic-based selection of trees by mountain pine beetle during a climate change-driven outbreak in a high-elevation pine forest. *Frontiers in Plant Science*, 9, 993 à 993. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00993>.

Smith, J. M., Paritsis, J., Veblen, T. T. et Chapman, T. B. (2015). Permanent forest plots show accelerating tree mortality in subalpine forests of the Colorado front range from 1982 to 2013. *Forest Ecology and Management*, 341, 8 à 17. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.12.031>.

Srivastava, D. S., Coristine, L., Angert, A. L., Bontrager, M., Amundrud, S. L., Williams, J. L., Yeung, A. C. Y., Zwaan, D. R., Thompson, P. L., Aitken, S. N., Sunday, J. M., O'Connor, M. I., Whitton, J., Brown, N. E. M., MacLeod, C. D., Parfrey, L. W., Bernhardt, J. R., Carrillo, J., Harley, C. D. G., Martone, P. T., Freeman, B. G., Tseng, M. et Donner, S. D. (2021). Wildcards in climate change biology. *Ecological Monographs*, 91(4), s.o. <https://doi.org/10.1002/ecm.1471>.

Stocks, B. J. (1987). Fire potential in the spruce-budworm damaged forests of Ontario. *The Forestry Chronicle*, 63(1), 8 à 14.

Sturrock, R. N., Frankel, S. J., Brown, A. V., Hennon, P. E., Kliejunas, J. T., Lewis, K. J., Worrall, J. J. et Woods, A. J. (2011). Climate change and forest diseases. *Plant Pathology*, 60(1), 133 à 149. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02406.x>.

Sturtevant, B. R. et Fortin, M. (2021). Understanding and modeling forest disturbance interactions at the landscape level. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.653647>.

Sturtevant, B. R., Miranda, B. R., Shinneman, D. J., Gustafson, E. J. et Wolter, P. T. (2012). Comparing modern and pre-settlement forest dynamics of a subboreal wilderness: Does spruce budworm enhance fire risk? *Ecological Applications*, 22(4), 1278 à 1296.

- Tai, A. R. et Carroll, A. L. (2022). In the pursuit of synchrony: Northward shifts in western spruce budworm outbreaks in a warming environment. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.895579>.
- Taylor, A. R., Boulanger, Y., Price, D. T., Cyr, D., McGarrigle, E., Rammer, W. et Kershaw, J. A. (2017). Rapid 21st century climate change projected to shift composition and growth of Canada's Acadian Forest Region. *Forest Ecology and Management*, 405, 284 à 294. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.07.033>.
- Teshome, D. T., Zharare, G. E. et Naidoo, S. (2020). The threat of the combined effect of biotic and abiotic stress factors in forestry under a changing climate. *Frontiers in Plant Science*, 11, 601009. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.601009>.
- Vogt, J. T. (2020). Interactions between weather-related disturbance and forest insects and diseases in the southern United States. (no. 255.) Asheville, NC: United States Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station.
- Volney, W. J. A. et Fleming, R. A. (2000). Climate change and impacts of boreal forest insects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82(1), 283 à 294. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00232-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00232-2).
- Wang, W., Peng, C., Kneeshaw, D. D., Larocque, G. R. et Luo, Z. (2012). Drought-induced tree mortality: Ecological consequences, causes, and modeling. *Environmental Reviews*, 20(2), 109 à 121. <https://doi.org/10.1139/a2012-004>.
- Ward, S. F., Eidson, E. L., Kees, A. M., Venette, R. C. et Aukema, B. H. (2020). Allopatric populations of the invasive larch casebearer differ in cold tolerance and phenology. *Ecological Entomology*, 45(1), 56 à 66. <https://doi.org/10.1111/een.12773>.
- Wayman, R. B. et Safford, H. D. (2021). Recent bark beetle outbreaks influence wildfire severity in mixed-conifer forests of the Sierra Nevada, California, USA. *Ecological Applications*, 31(3), e02287, s.o. <https://doi.org/10.1002/eap.2287>.
- Welsh, C., Lewis, K. J. et Woods, A. J. (2014). Regional outbreak dynamics of *Dothistroma* needle blight linked to weather patterns in British Columbia, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 44(3), 212 à 219. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0387>.
- Whitman, E., Parisien, M., Thompson, D. K. et Flannigan, M. D. (2019). Short-interval wildfire and drought overwhelm boreal forest resilience. *Scientific Reports*, 9(1), 18796 à 18812. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55036-7>.
- Woods, A. J., Heppner, D., Kope, H. H., Burleigh, J. et Maclauchlan, L. (2010). Forest health and climate change: A British Columbia perspective. *Forestry Chronicle*, 86(4), 412 à 422. <https://doi.org/10.5558/tfc86412-4>.
- Worrall, J. J., Rehfeldt, G. E., Hamann, A., Hogg, E. H., Marchetti, S. B., Michaelian, M. et Gray, L. K. (2013). Recent declines of *Populus tremuloides* in north America linked to climate. *Forest Ecology and Management*, 299, 35 à 51. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.033>.
- Zhang, X., Lei, Y., Ma, Z., Kneeshaw, D. et Peng, C. (2014). Insect-induced tree mortality of boreal forests in eastern Canada under a changing climate. *Ecology and Evolution*, 4(12), 2384 à 2394.

## NON CITÉS

Les ouvrages suivants sont fournis à titre indicatif, en raison de leur pertinence par rapport au thème des avancées conceptuelles en matière d'interactions entre les perturbations.

### Changements climatiques

Anderegg, W. R. L., Trugman, A. T., Badgley, G., Anderson, C. M., Bartuska, A., Ciais, P., Cullenward, D., Field, C. B., Freeman, J., Goetz, S. J., Hicke, J. A., Huntzinger, D., Jackson, R. B., Nickerson, J., Pacala, S. et Randerson, J. T. (2020). Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science (American Association for the Advancement of Science)*, 368(6497) <https://doi.org/10.1126/science.aaz7005>.

Battisti, A., Stastny, M., Buffo, E. et Larsson, S. (2006). Rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology*, 12(4), 662 à 671. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01124.x>.

Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A. et Larsson, S. (2005). Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, 15(6), 2084 à 2096. <https://doi.org/10.1890/04-1903>.

Candau, J. et Fleming, R. A. (2011). Forecasting the response of spruce budworm defoliation to climate change in Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(10), 1948 à 1960. <https://doi.org/10.1139/x11-134>.

Eagar, C., Adams, M. B., SpringerLINK eBooks—English/International Collection (Archive) et SpringerLink (service en ligne). (1992). Dans Eagar C., Adams M. B. (Eds.), *Ecology and decline of red spruce in the eastern United States*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2906-3>.

Fuentealba, A., Pureswaran, D., Bauce, É. et Despland, E. (2017). How does synchrony with host plant affect the performance of an outbreaking insect defoliator? *Oecologia*, 184(4), 847 à 857. <https://doi.org/10.1007/s00442-017-3914-4>.

Hepting, G. H. (1963). Climate and forest diseases. *Annual Review of Phytopathology*, 1(1), 31 à 50. <https://doi.org/10.1146/annurev.py.01.090163.000335>.

Hogg, E. H. et Michaelian, M. (2015). Factors affecting fall down rates of dead aspen (*Populus tremuloides*) biomass following severe drought in west-central Canada. *Global Change Biology*, 21(5), 1968 à 1979. <https://doi.org/10.1111/gcb.12805>.

Huang, J., Kautz, M., Trowbridge, A. M., Hammerbacher, A., Raffa, K. F., Adams, H. D., Goodsman, D. W., Xu, C., Meddens, A. J. H., Kandasamy, D., Gershenson, J., Seidl, R. et Hartmann, H. (2020). Tree defence and bark beetles in a drying world: Carbon partitioning, functioning, and modelling. *The New Phytologist*, 225(1), 26 à -36. <https://doi.org/10.1111/nph.16173>.

Hubbart, J. A., Guyette, R., Muzika, R., UT-Battelle LLC/ORNL, Oak Ridge, TN (États-Unis) et University of Missouri, Columbia, MO (États-Unis). (2016). More than drought: Precipitation variance, excessive wetness, pathogens, and the future of the western edge of the eastern deciduous forest. *The Science of the Total Environment*, 566 à 567(C) <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.108>.

Jepsen, J. U., Hagen, S. B., Ims, R. A. et Yoccoz, N. G. (2008). Climate change and outbreaks of the geometrids *Operophtera brumata* and *Epirrita autumnata* in subarctic birch forest: Evidence of a recent outbreak range expansion. *The Journal of Animal Ecology*, 77(2), 257 à 264. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2007.01339.x>.

- Jepsen, J. U., Kapari, L., Hagen, S. B., Schott, T., Vindstad, O. P. L., Nilssen, A. C. et Ims, R. A. (2011). Rapid northwards expansion of a forest insect pest attributed to spring phenology matching with subarctic birch. *Global Change Biology*, 17(6), 2071 à 2083. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02370.x>.
- Kliejunas, J. T. (2011). A risk assessment of climate change and the impact of forest diseases on forest ecosystems in the western United States and Canada. GTR-236. Albany, CA : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station.
- Kneeshaw, D. D., Sturtevant, B. R., DeGrandpé, L., Doblas-Miranda, E., James, P. M. A., Tardif, D. et Burton, P. J. (2021). The vision of managing for pest-resistant landscapes: Realistic or utopic? *Current Forestry Reports*, 7(2), 97 à 113. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00140-z>.
- Kosiba, A. M., Schaberg, P. G., Rayback, S. A. et Hawley, G. J. (2018). The surprising recovery of red spruce growth shows links to decreased acid deposition and elevated temperature. *The Science of the Total Environment*, 637 à 638, 1480 à 1491. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.010>.
- Lautenschlager, R. A. et Nielsen, C. (1999). Ontario's forest science efforts following the 1998 ice storm. *Forestry Chronicle*, 75(4), 633 à 641. <https://doi.org/10.5558/tfc75633-4>.
- Marini, L., Ayres, M. P., Battisti, A. et Faccoli, M. (2012). Climate affects severity and altitudinal distribution of outbreaks in an eruptive bark beetle. *Climatic Change*, 115(2), 327 à 341. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0463-z>.
- Mattson, W. J. et Haack, R. A. (1987). The role of drought in outbreaks of plant-eating insects. *Bioscience*, 37(2), 110 à 118. <https://doi.org/10.2307/131036>.
- potassium deficiency, past disturbances, and climate change. *Canadian Journal of Forest Research*, 43(1), 66 à 77. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2293>.
- Portalier, S. M. J., Candau, J. et Lutscher, F. (2022). A temperature-driven model of phenological mismatch provides insights into the potential impacts of climate change on consumer–resource interactions. *Ecography (Copenhagen)*, 2022(8), s.o. <https://doi.org/10.1111/ecog.06259>.
- Price, D. T., Alfaro, R. I., Brown, K. J., Flannigan, M. D., Fleming, R. A., Hogg, E. H., Girardin, M. P., Lakusta, T., Johnston, M., McKenney, D. W., Pedlar, J. H., Stratton, T., Sturrock, R. N., Thompson, I. D., Trofymow, J. A. et Venier, L. A. (2013). Anticipating the consequences of climate change for Canada's boreal forest ecosystems. *Environmental Reviews*, 21(4), 322 à 365. <https://doi.org/10.1139/er-2013-0042>.
- Seidl R. (2014). The Shape of Ecosystem Management to Come: Anticipating Risks and Fostering Resilience. *Bioscience*. Le 1er décembre 2014; 64(12) : 1159 à 1169. <https://doi.org/10.1093/biosci/biu172> PMID : 25729079; PMCID : PMC4340566.
- Seidl, R. et Rammer, W. (2017; 2016). Climate change amplifies the interactions between wind and bark beetle disturbances in forest landscapes. *Landscape Ecology*, 32(7), 1485 à 1498. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0396-4>.
- Temperli, C., Bugmann, H. et Elkin, C. (2013). Cross-scale interactions among bark beetles, climate change, and wind disturbances: A landscape modeling approach. *Ecological Monographs*, 83(3), 383 à 402. <https://doi.org/10.1890/12-1503.1>.
- Temperli, C., Veblen, T. T., Hart, S. J., Kulakowski, D. et Tepley, A. J. (2015). Interactions among spruce beetle disturbance, climate change and forest dynamics captured

y a forest landscape model. *Ecosphere* (Washington, D.C), 6(11), art231-20. <https://doi.org/10.1890/ES15-00394.1>.

### Modèles

Ashraf, M. I., Meng, F., Bourque, C. P. et MacLean, D. A. (2015). A novel modelling approach for predicting forest growth and yield under climate change. *PloS One*, 10(7), e0132066-e0132066. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132066>.

Barros, C., Luo, Y., Chubaty, A. M., Eddy, I. M. S., Micheletti, T., Boisvenue, C., Andison, D. W., Cumming, S. G. et McIntire, E. J. B. (2022). Empowering ecological modellers with a PERFICT workflow: Seamlessly linking data, parameterisation, prediction, validation and visualisation. *Methods in Ecology and Evolution*, <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14034>.

### Perturbations écologiques

Anyomi, K. A., Neary, B., Chen, J. et Mayor, S. J. (2022). A critical review of successional dynamics in boreal forests of North America. *Environmental Reviews*, 30(4), 563 à 594. <https://doi.org/10.1139/er-2021-0106>.

Battisti, C., Poeta, G., Fanelli, G., SpringerLink (service en ligne) et livres numériques SpringerLINK -Earth and Environmental Science. (2016). An introduction to disturbance ecology: A road map for wildlife management and conservation. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32476-0>.

Boulangier, Y., Gray, D. R., Cooke, B. J. et De Grandpré, L. (2016). Model-specification uncertainty in future forest pest outbreak. *Global Change Biology*, 22(4), 1595 à 1607. <https://doi.org/10.1111/gcb.13142>.

Bowd, E. J., Banks, S. C., Bissett, A., May, T. W., Lindenmayer, D. B. et Novotny, V. (2021). Direct and indirect disturbance impacts in forests. *Ecology Letters*, 24(6), 1225 à 1236. <https://doi.org/10.1111/ele.13741>.

Garmestani, A., Twidwell, D., Angeler, D. G., Sundstrom, S., Barichievy, C., Chaffin, B. C., Eason, T., Graham, N., Granholm, D., Gunderson, L., Knutson, M., Nash, K. L., Nelson, R. J., Nystrom, M., Spanbauer, T. L., Stow, C. A., Allen, C. R. et Sveriges lantbruksuniversitet. (2020). Panarchy: Opportunities and challenges for ecosystem management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18(10), 576 à 583. <https://doi.org/10.1002/fee.2264>.

Gunderson, L. (2008). panarchy. *Encyclopedia of ecology* (deuxième édition, p. 612 à 616). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63768-0.00695-8>.  
Kulakowski, D., Buma, B., Guz, J. et Hayes, K. (2013). The ecology of forest disturbances. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11878-0>.

Lucash, M. S., Scheller, R. M., Sturtevant, B. R., Gustafson, E. J., Kretchun, A. M. et Foster, J. R. (2018). More than the sum of its parts: How disturbance interactions shape forest dynamics under climate change. *Ecosphere* (Washington, D.C.), 9(6), s.o.

Munson, S. M., Reed, S. C., Peñuelas, J., McDowell, N. G., Sala, O. E. et Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (États-Unis). (2018). Ecosystem thresholds, tipping points, and critical transitions. *The New Phytologist*, 218(4), 1315 à 1317. <https://doi.org/10.1111/nph.15145>.

Romme, W. H., Everham, E. H., Frelich, L. E., Moritz, M. A. et Sparks, R. E. (1998). Are large, infrequent disturbances qualitatively different from small, frequent disturbances? *Ecosystems* (New York), 1(6), 524 à 534. <https://doi.org/10.1007/s100219900048>.

Seidl, R. et Turner, M. G. (2022). Post-disturbance reorganization of forest ecosystems in a changing world. *Proceedings of the National Academy of Sciences—PNAS*, 119(28), 1-e2202190119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2202190119>.

Sousa, W. P. (1984). The role of disturbance in natural communities. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 15(1), 353 à 391.

<https://doi.org/10.1146/annurev.es.15.110184.002033>.

## ANNEXE - GLOSSAIRE DES INTERACTIONS ENTRE LES PERTURBATIONS

De : Burton, P. J., Jentsch, A. et Walker, L. R. (2020). The ecology of disturbance interactions. *Bioscience*, 70(10), 854 à 870. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa088>, sauf indication contraire.

Legs biologique	Caractéristique biotique (biomasse, structure ou fonction) ou empreinte d'un écosystème qui subsiste après une perturbation.
Cascade	Séquence de plus de deux perturbations, chacune déclenchée par la précédente. Il peut s'agir d'une seule voie (chaîne) ou d'un ensemble de voies en interaction (réseau).
Chaîne	Voir « Cascade ».
Perturbations composées	Perturbations multiples qui se produisent sans laisser suffisamment de temps à l'écosystème pour se rétablir entre elles.
Effets cumulatifs	L'impact net de multiples facteurs de stress, de perturbations ou de dégradation, qui peuvent être additifs ou synergiques.
Perturbation	Changement relativement brutal affectant la disponibilité des ressources, la structure ou la fonction écologique, souvent associé à la conversion de la biomasse vivante en biomasse morte.
Agent perturbateur	Type de perturbation : éruption volcanique, glissement de terrain, inondation, incendie, herbivorie ou culture.
Régime de perturbation	La combinaison d'agents perturbateurs et d'attributs de perturbation qui caractérisent un paysage ou une région particulière.
Rétablissement de l'écosystème	Processus de retour à un état antérieur à la perturbation ou à un autre état en ce qui concerne la biomasse, la structure, la fonction ou la composition des espèces. Voir « Succession ».
Événements extrêmes	Perturbations graves et statistiquement peu fréquentes, laissant un legs biologique peu abondant. Voir « Legs biologique ».
Interactions	L'altération d'une perturbation (par exemple, la probabilité, l'étendue ou la gravité) par une perturbation antérieure ou cooccurrence.
Retard	Délai temporel entre deux événements séquentiels ou entre un déclencheur et une réponse.
Lien	Lorsqu'une perturbation est un facteur causal dans l'apparition ou les attributs d'une perturbation ultérieure.
Boucle	Une séquence de perturbations liées entre elles qui ramène un écosystème à un état antérieur.
Réseau	Voir « Cascade ».
Conditions de référence ou dynamique de référence	Attributs d'un écosystème avant une perturbation ou un changement de régime de perturbation.
Résilience	Capacité à retrouver les conditions antérieures à la perturbation (Kleinman et coll. 2019).
Résistance	Capacité à résister aux perturbations sans changer (Kleinman et coll. 2019).
Succession	Changement dans la composition des espèces au fil du temps, généralement déclenché par une perturbation. Voir « Rétablissement de l'écosystème ».
Seuil	Degré d'intensité du stress ou de la perturbation qui entraîne un changement brutal ou qualitatif du système, tel que la mortalité ou la propagation de la perturbation.

**CE DOCUMENT EST UN PRODUIT DU GROUPE DE TRAVAIL SUR LES  
RAVAGEURS FORESTIERS DU CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DES  
FORÊTS (2023)**

*Cet ouvrage est publié en anglais sous le titre: Review of  
Conceptual Advances in Disturbance Interactions. Phase One:  
Knowledge Synthesis, Knowledge Gaps, and Next Steps*

our de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec  
le secrétariat du Groupe de travail sur les ravageurs forestiers:  
**[PRMintegrationhub-equipeintegrationGRR@nrcan-rncan.gc.ca](mailto:PRMintegrationhub-equipeintegrationGRR@nrcan-rncan.gc.ca)**