



L'aménagement forestier dans un contexte d'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette

Guide de référence pour moduler les activités
d'aménagement dans les forêts privées

Québec 

L'aménagement forestier dans un contexte d'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette

Guide de référence pour moduler les activités d'aménagement dans les forêts privées



Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers
Direction de la protection des forêts

Québec, janvier 2015

Coordonnatrice

Marie-Ève Roy, ing.f., MBA, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers

Auteurs

Michel Chabot, ing.f., consultant en protection des forêts; Pierre Beaupré, ing.f., Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers; Cédric Fournier, ing.f., M. Sc., Direction de la protection des forêts; Marie-Ève Roy, ing.f., MBA, Marie-Andrée Vaillancourt, biol., M. Sc. et Jean-Pierre Jetté, ing.f., Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers; Mathieu Bouchard, ing.f., Ph. D., Direction de la recherche forestière

Collaborateurs

Jacques Gravel, Michel Huot, Marc Leblanc et Alain Schreiber, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers; Sébastien Bélanger, Sylvie Jean, Louis Morneau et Danièle Pouliot, Direction de la protection des forêts; Jacques Duval et Mélanie Rioux, Secteur des opérations régionales

Remerciements

Frédéric Bujold, Louis De Grandpré, Sylvie Delisle, Jean-Luc Fafard, Lyne Giasson, Patrick James, Daniel Kneeshaw, Catherine Larouche, Nathalie Laurencelle, Martin Lepage, Hubert Morin, David Pothier, Martin Simard, Nelson Thiffault, Stéphane Tremblay et Kaysandra Waldron

Photos

Direction de la protection des forêts, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, Michel Chabot (consultant en protection des forêts), Denise Dubeau, Direction de la recherche forestière et Jacques Duval (Unité de gestion Manicouagan-Outardes)

Page couverture : Sébastien Méthot, Marie-Ève Roy et Michel Chabot

Pour plus de renseignements

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
5700, 4^e Avenue Ouest
Québec (Québec) G1H 6R1
Téléphone : 418 627-8600
Ligne sans frais : 1 866 248-6936
Télécopieur : 418 644-6513
Courriel : services.clientele@mffp.gouv.qc.ca
Site Web : forets.gouv.qc.ca
DAEF-0357

Cette publication, conçue pour une impression recto verso, est uniquement accessible en ligne à l'adresse suivante : www.mffp.gouv.qc.ca/forets/privees/privees-amenagement.jsp

Référence : MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS (2015). *L'aménagement forestier dans un contexte d'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette – Guide de référence pour moduler les activités d'aménagement dans les forêts privées*, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, Direction de la protection des forêts, 87 p.

Mots clés : aménagement, boisé, défoliation, épidémie, forêt privée, Québec, sapin, tordeuse des bourgeons de l'épinette, traitement sylvicole

Keywords: defoliation, fir, forest management, outbreak, private woodlot, Quebec, silvicultural treatment, spruce budworm

© Gouvernement du Québec
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2015
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2015
ISBN : 978-2-550-72108-6

Table des matières

Introduction.....	1
Chapitre 1 Quelques notions sur la tordeuse des bourgeons de l'épinette, les épidémies et leur influence sur la dynamique des forêts	3
1.1 Bref historique des épidémies et variabilité de leur gravité	3
1.2 Dynamique des populations et cycles des épidémies.....	6
1.3 Susceptibilité.....	6
1.4 Vulnérabilité	7
1.4.1 À l'échelle de l'arbre	8
1.4.2 À l'échelle du peuplement.....	9
1.4.3 À l'échelle d'un territoire	10
1.5 Déroulement d'une épidémie et progression de la mortalité	12
1.5.1 Période d'endémie	12
1.5.2 Période d'épidémie	13
1.6 Dégradation des arbres	16
1.7 Détermination des périodes propices à la récolte des peuplements vulnérables	20
1.8 Attributs écologiques des peuplements façonnés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette	23
Chapitre 2 Analyse de la vulnérabilité et suivi de l'épidémie	25
2.1 Évaluation de la vulnérabilité de la forêt.....	26
2.1.1 Méthode de classification	27
2.1.1.1 À l'échelle du peuplement.....	27
2.1.1.2 À l'échelle d'un territoire	31
2.1.1.3 Analyse et diagnostic	32
2.2 Suivi de l'épidémie	33
2.2.1 Suivi de l'insecte	33
2.2.2 Évaluation du niveau de population des larves en hibernation.....	36
2.2.3 Évaluation de la défoliation des pousses annuelles	36
2.2.4 Historique de la défoliation	39
2.2.5 Évaluation de l'état de santé des peuplements touchés par l'épidémie adaptée à la forêt privée	40
2.3 Moyens disponibles pour faire face à l'épidémie.....	43
Chapitre 3 Orientations sylvicoles et ordonnancement de la récolte	47
3.1 Fondements physiologiques et biologiques	47
3.1.1 Considérations habituelles pour la sylviculture des résineux	47
3.1.2 Considérations propres à un contexte d'épidémie.....	50
3.2 Modulation des traitements sylvicoles	50
3.2.1 Superficies non ou mal régénérées en essences désirées	52
3.2.2 Peuplements au stade de semis	52
3.2.3 Peuplements au stade de gaulis.....	54
3.2.4 Peuplements au stade de prématurité	58
3.3 Modulation de la récolte dans les peuplements matures	59

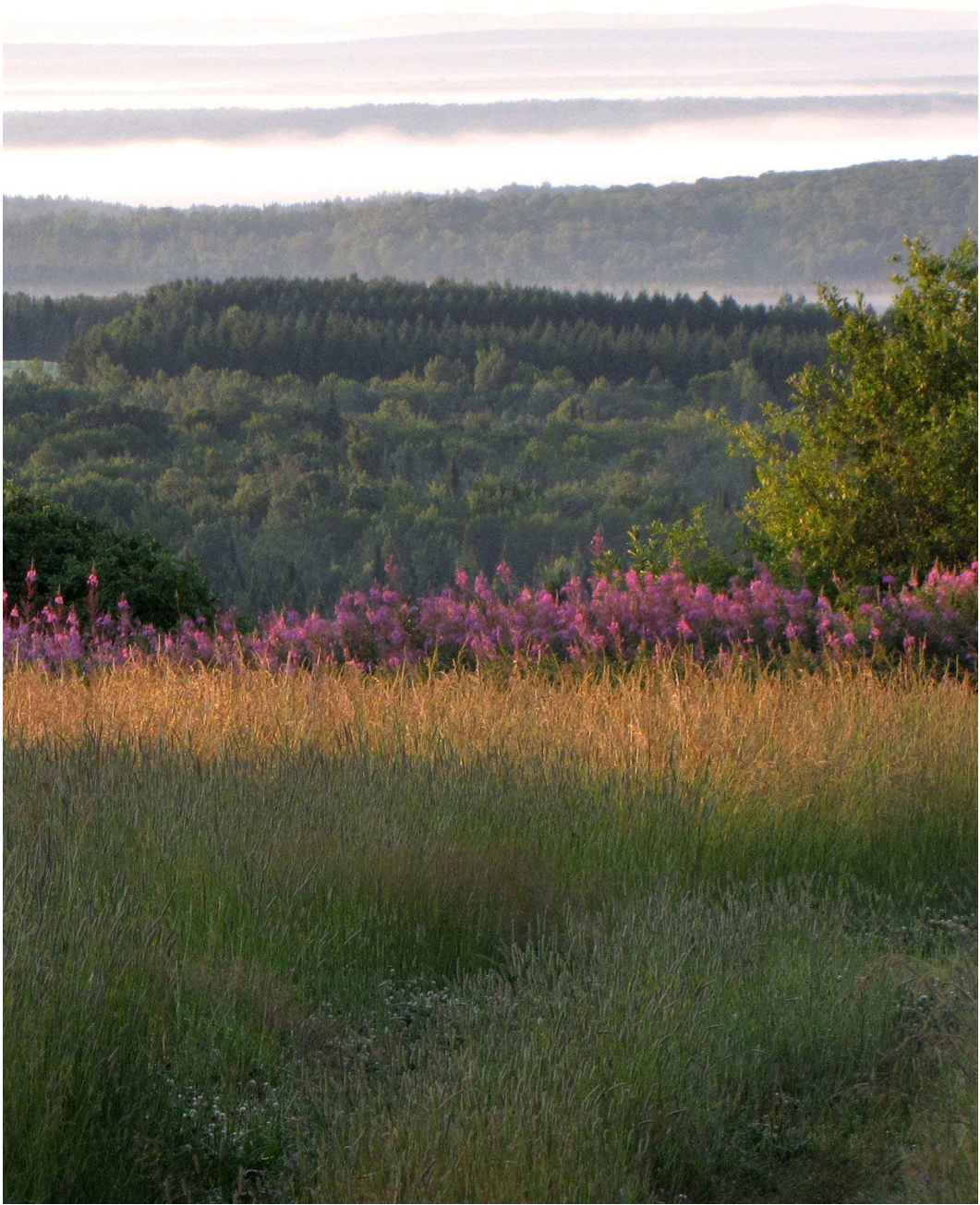
3.3.1	Procédés de régénération concernés	59
3.3.2	Les coupes progressives sont-elles souhaitables et possibles?	60
3.3.3	Principes orientant la récolte	63
3.3.4	Ordonnancement des coupes progressives et totales en fonction du déroulement de l'épidémie	65
3.3.5	Coupe avec protection des petites tiges marchandes et coupes de succession	65
	Conclusion.....	67
	Annexe A Vocabulaire relatif à l'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette	69
	Annexe B Cycle vital de la tordeuse des bourgeons de l'épinette.....	72
	Annexe C Évaluation de la défoliation totale des arbres.....	73
	Bibliographie	83

Liste des tableaux

Tableau 1	Description des cinq phases associées aux périodes d'épidémie et d'endémie en fonction de trois indicateurs : les populations de l'insecte, la défoliation et la mortalité des arbres.....	12
Tableau 2	Potentiel de transformation d'un arbre en fonction de son état général	22
Tableau 3	Description des classes de vulnérabilité proposées	27
Tableau 4	Type de couvert et groupement et sous-groupement synthèse d'essences proposés pour la classification de la vulnérabilité	28
Tableau 5	Relation entre la classe d'âge et le stade de développement des peuplements par domaine ou sous-domaine pour les groupements d'essences avec sapin	28
Tableau 6	Qualité de site pour le sapin, évaluée à partir du régime hydrique découlant des caractéristiques physiques du milieu	29
Tableau 7	Classe de vulnérabilité selon le groupement et le sous-groupement synthèse d'essences, le stade de développement et la qualité du site pour le sapin baumier	29
Tableau 8	Seuils d'altitude proposés pour adapter la classification de la vulnérabilité dans les domaines de la sapinière à bouleau blanc et de la pessière à mousses.....	32
Tableau 9	Niveau de population et défoliation des pousses annuelles prévue à partir du dénombrement des larves en hibernation	36
Tableau 10	Classe de défoliation totale (%), code utilisé lors du relevé et interprétation quant à l'état de santé des arbres et à leur risque de mortalité à court terme.....	42
Tableau 11	Résumé des moyens disponibles pour faire face à l'épidémie dans la forêt privée	44
Tableau 12	Essences en raréfaction favorisées par les coupes progressives et concurrence pour la lumière des essences à maîtriser dans les végétations potentielles comportant beaucoup de sapins	61
Tableau 13	Ordonnancement de la récolte en fonction du déroulement de l'épidémie.....	65

Liste des figures

Figure 1	Illustration des six périodes d'épidémie ayant eu lieu entre les années 1800 et 2000, à partir du pourcentage d'épinettes blanches affectées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette au cours de leur vie.....	4
Figure 2	Territoire susceptible de subir de la défoliation par la tordeuse des bourgeons de l'épinette, déterminé à l'aide des données historiques de la défoliation de 1938 à 2012.....	7
Figure 3	Territoire forestier vulnérable à la tordeuse des bourgeons de l'épinette lors de l'épidémie de 1967-1992, déterminé à partir de la mortalité partielle et totale observée au terme de cette épidémie (2 ^e et 3 ^e inventaires)	11
Figure 4	Étendue et gravité des défoliations annuelles causées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec, de 1938 à 2008, par sous-domaine bioclimatique	14
Figure 5	Domaines et sous-domaines bioclimatiques du Québec méridional.....	15
Figure 6	Modèle typique de progression de la mortalité causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans une sapinière mature	16
Figure 7	Proportion d'arbres demeurant debout et entiers entre un et cinq ans après leur mort causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette	17
Figure 8	Succession des insectes xylophages chez des arbres moribonds et morts depuis un à cinq ans	18
Figure 9	Illustration de l'aubier et du bois de cœur d'un arbre	18
Figure 10	Évolution de la coloration et de la carie de l'aubier et du bois de cœur pour des sapins moribonds (0) et des sapins morts depuis un à cinq ans.....	19
Figure 11	Période de récupération pour le sciage et la pâte pour un modèle typique de progression de la mortalité causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans une sapinière mature.....	21
Figure 12	Cartographie de l'historique d'une défoliation causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette	39
Figure 13	Représentation du bois juvénile et du bois mature	48



INTRODUCTION

Une épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette sévit actuellement dans certaines régions du Québec. Son développement est toutefois fort différent de celui des deux dernières épidémies, puisque le rythme auquel les superficies ont été touchées n'est pas le même (Ministère des Ressources naturelles, 2013a). Cette épidémie a débuté en 1992 dans le sud de l'Outaouais. Elle est demeurée très localisée et de faible amplitude pendant près de 15 ans, touchant surtout de petites propriétés privées. À partir de 2006, le rythme de propagation s'est accéléré, principalement dans les régions de la Côte-Nord et du Saguenay–Lac-Saint-Jean. Depuis 2012, l'épidémie touche aussi les régions du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine où une partie importante des forêts touchées est de tenure privée. Le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) en suit l'évolution de près tant dans les forêts publiques que privées.

Le MFFP met à la disposition des divers intervenants des outils pour les aider à prendre des décisions éclairées à propos de leurs activités d'aménagement forestier dans un contexte d'épidémie imminente ou en cours. L'approche de gestion proposée par le Ministère pour la forêt privée a pour objectif de :

- minimiser les pertes de revenus pour les propriétaires, le cas échéant;
- récolter en priorité les peuplements les plus vulnérables afin d'éviter l'encombrement des marchés avec des bois provenant de peuplements qui sont peu ou qui ne sont pas vulnérables;
- maintenir un capital forestier à moyen et à long terme, à la fois pour sa valeur économique et pour sa valeur faunique, récréative et de conservation;
- s'assurer d'appliquer les traitements sylvicoles appropriés dans le contexte d'une épidémie imminente ou en cours pour ne pas compromettre l'avenir des peuplements.

Le présent guide s'inscrit dans cette perspective; il s'adresse aux professionnels de la forêt privée œuvrant, entre autres, auprès des agences de mise en valeur de la forêt privée, des syndicats de producteurs forestiers, des municipalités régionales de comté (MRC), des groupements forestiers ou à titre de conseillers forestiers indépendants auprès des propriétaires de boisés.

Le premier chapitre fournit des informations sur l'insecte et ses interactions avec les écosystèmes forestiers afin de mieux comprendre son rôle et ses effets sur la forêt. Le deuxième chapitre propose une démarche et des outils permettant d'évaluer la situation à l'échelle du peuplement et de déterminer les peuplements les plus vulnérables. Le chapitre 3 présente les recommandations du MFFP concernant la modulation des activités d'aménagement forestier et les actions sylvicoles à effectuer selon le déroulement de l'épidémie.



Tordeuse sur une pousse de sapin défoliée



CHAPITRE 1

Quelques notions sur la tordeuse des bourgeons de l'épinette, les épidémies et leur influence sur la dynamique des forêts

Pour être en mesure de moduler les activités d'aménagement avant, pendant et après une épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, il est important de bien comprendre le rôle joué par cet insecte en milieu forestier. Les sections qui suivent permettront de bien saisir la relation qui existe entre la tordeuse des bourgeons de l'épinette et l'écosystème forestier¹.

Les informations présentées dans ces sections proviennent à la fois de la littérature scientifique, de rapports techniques, de données du MFFP, publiées ou non, de même que d'échanges et de discussions avec des chercheurs et des praticiens qui connaissent bien la tordeuse des bourgeons de l'épinette.

Ce premier chapitre n'a pas pour prétention ni pour objectif de faire une revue exhaustive de la littérature scientifique publiée sur le sujet, mais vise plutôt à en faire ressortir les grandes lignes pour la compréhension des aménagistes et des praticiens ainsi que pour appuyer le développement d'outils de gestion qui intègrent les informations les plus pertinentes dans le contexte québécois.

1.1 Bref historique des épidémies et variabilité de leur gravité

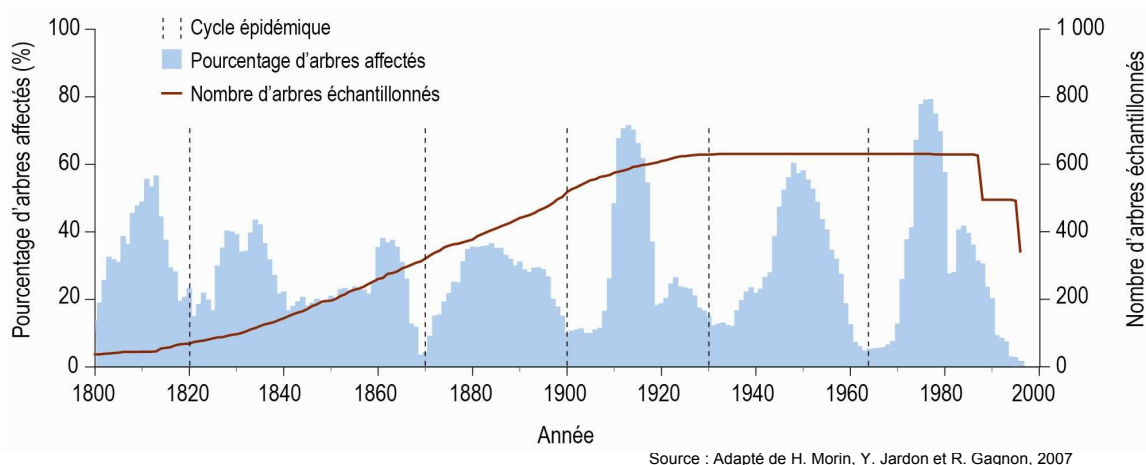
Plusieurs chercheurs ont travaillé à reconstituer l'histoire des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Une bonne synthèse de leurs travaux a été réalisée par Morin et autres (2008). Le texte qui suit ne donne qu'un très bref aperçu du sujet.

Des études dendrochronologiques sur des arbres fossiles et la mesure de la densité des fèces de la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans des tourbières ont permis de déterminer et de caractériser six périodes d'épidémie au cours des deux derniers siècles (figure 1)². En général, les trois épidémies qui se sont déroulées au 19^e siècle auraient touché une plus faible proportion d'arbres et mis plus de temps à y parvenir que celles qui se sont produites au 20^e siècle. L'alternance de gravité des trois épidémies du 20^e siècle est relativement bien documentée. De façon générale, les épidémies des années 1920 et des années 1980 ont été plus graves que celle des années 1950. À l'échelle régionale ou locale cependant, l'alternance de gravité peut avoir été différente de celle observée à l'échelle provinciale. La reconstitution des épidémies antérieures a permis d'observer un déplacement de la zone optimale de développement de l'insecte vers le nord. En raison des changements climatiques, il faudra suivre

1. Le lecteur peut consulter l'annexe A pour avoir plus d'informations sur les principaux termes utilisés pour décrire les différentes facettes d'une épidémie.

2. Plusieurs chercheurs ont travaillé à reconstituer l'histoire des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Une bonne synthèse des travaux sur le sujet a été faite par Morin et autres (2008).

de près la situation de l'épidémie actuelle de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, puisque la zone optimale de développement pourrait se déplacer davantage vers le nord (Régnière, St-Amand et Duval, 2012; voir l'encadré sur les changements climatiques à la page suivante).



Source : Adapté de H. Morin, Y. Jardon et R. Gagnon, 2007

Figure 1 Illustration des six périodes d'épidémie ayant eu lieu entre les années 1800 et 2000, à partir du pourcentage d'épinettes blanches affectées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette au cours de leur vie

À ce jour, il n'y a pas de consensus scientifique en ce qui concerne les facteurs ayant causé ces variations d'intensité entre les épidémies; il pourrait s'agir de variations climatiques, de changements de composition forestière à très grande échelle, du hasard ou d'interactions entre ces facteurs (Centre d'étude sur la forêt, 2008).

Le climat influence directement les caractéristiques de la forêt, notamment sa composition, en limitant la survie et la croissance des différentes essences le long de gradients latitudinal et altitudinal. Il influence aussi le régime des perturbations naturelles (feux, insectes, chablis) qui, à son tour, conditionne la dynamique forestière. Par ailleurs, les caractéristiques de la forêt sont aussi influencées par l'homme. Blais (1984) a proposé l'influence anthropique comme cause possible de l'aggravation des épidémies au cours du 20^e siècle. Boulet (2001) a poursuivi cette réflexion lors d'un colloque sur la tordeuse des bourgeons de l'épinette tenu à Shawinigan en 2001. Le résultat de ces réflexions est présenté ci-après.

Au Québec, particulièrement à partir du 19^e siècle, les coupes forestières ont souvent favorisé le sapin baumier, une essence capable de coloniser une grande variété de sites. Mentionnons notamment la récolte du pin blanc dans les vallées du Saint-Laurent et de l'Outaouais, laquelle était faite pendant l'hiver, favorisant ainsi la régénération du sapin au détriment du pin blanc. Des coupes à diamètre limite dans plusieurs régions ont, par la suite, permis d'extraire les grosses épinettes blanches de la forêt, causant ainsi leur diminution progressive. Le sapin baumier, déjà établi en sous-étage, a profité de ces ouvertures.

D'autres facteurs d'origine anthropique ont contribué à mettre en place des conditions favorables à une épidémie de grande envergure dans les années 1960. Parmi eux, l'introduction d'insectes exotiques qui ont décimé le mélèze (tenthrède du mélèze) et l'épinette blanche (diprion européen de l'épinette) a favorisé le sapin. L'amélioration de la lutte aux feux de forêt, particulièrement ceux d'origine humaine dans le sud du Québec, là où le sapin est plus

abondant, et les pulvérisations aériennes d'insecticide lors de la deuxième épidémie du 20^e siècle ont contribué à maintenir vivants des massifs forestiers. Finalement, la sous-exploitation du sapin dans certaines régions a aussi contribué à son abondance.

Somme toute, les activités humaines ont favorisé l'établissement ou la survie du sapin, souvent dans des conditions et sur des sites qui n'étaient pas optimaux, et son abondance n'a pas toujours été bien gérée par la suite.

Changements climatiques et tordeuse des bourgeons de l'épinette... facteurs d'incertitude

Les conséquences potentielles des changements climatiques sur le déroulement des épidémies d'insectes font partie des incertitudes auxquelles les forestiers devront faire face au cours des prochaines années. Les insectes sont généralement très sensibles à certaines variables climatiques. Pour plusieurs espèces, les modèles prédisent une plus grande probabilité d'observer des hausses de populations explosives sous un climat plus chaud, en raison notamment d'une amélioration du synchronisme entre le développement des insectes et la disponibilité de leurs hôtes, ainsi que de la probabilité accrue qu'elles échappent au contrôle de leurs ennemis naturels (Logan, Régnière et Powell, 2003).

Dans le cas des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, la limite nord et la limite sud de la zone de défoliation seraient fortement influencées par le climat (Régnière, St-Amant et Duval, 2012). Cette hypothèse est fondée sur les observations suivantes : au nord, la saison de croissance n'est pas suffisamment longue pour permettre à l'insecte de passer à travers toutes les étapes de son cycle vital (Régnière, St-Amant et Duval, 2012), alors qu'au sud, une arrivée tardive des températures hivernales cause un retard dans l'entrée en diapause¹ (Han et Bause, 1998), ce qui pourrait affaiblir les insectes et les exposer davantage à différents facteurs de mortalité. En principe, une augmentation des températures de l'ordre de ce qui est actuellement prévu dans nos régions (Logan et autres, 2011) pourrait occasionner un déplacement vers le nord des effets associés à l'occurrence d'épidémies graves. Il est toutefois important de souligner que les conséquences des épidémies seront également conditionnées par d'autres facteurs tels que la présence et l'abondance relatives des espèces hôtes, dont l'influence viendra moduler l'effet du climat sur le cycle de vie des insectes.

Les patrons d'épidémie observés lors des dernières décennies, et même lors des derniers siècles, semblent appuyer l'hypothèse d'une influence climatique sur les effets de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (voir la section 1.3). Le réchauffement progressif du climat depuis les derniers 150 ans (depuis la fin du petit âge glaciaire vers 1850 à 1870) a en effet coïncidé avec une forte augmentation de la gravité des épidémies au Québec (Morin et autres, 2008). Avant le 20^e siècle, les épidémies graves étaient surtout observées dans les États de la Nouvelle-Angleterre (Cooke, 2014). De même, on a noté une augmentation de la défoliation causée par l'insecte dans certains massifs conifériens, situés plus au nord ou en altitude, qui avaient été peu touchés jusque-là. C'est notamment le cas sur la Côte-Nord où la dernière épidémie a eu des conséquences inattendues (Bouchard et Pothier, 2010) et où les zones de défoliation grave causant la mort des arbres pourraient s'étendre plus au nord au cours de l'épidémie actuelle (De Grandpré et autres, 2014).

À la lumière de ces observations, et malgré le fait que les variations de la gravité entre les épidémies successives ne s'expliquent pas uniquement par des fluctuations climatiques, il est hautement probable, en raison des changements climatiques, que les répercussions de l'épidémie actuelle et de celles qui suivront seront différentes de ce qui a été observé lors des épidémies précédentes.

1. La diapause est la période d'arrêt temporaire du développement de la chenille de deuxième stade pour survivre à la période hivernale.

1.2 Dynamique des populations et cycles des épidémies

La dynamique des populations de la tordeuse des bourgeons de l'épinette est complexe. Elle est expliquée en partie par les interactions entre l'insecte, ses ennemis naturels et ses hôtes. Les facteurs naturels de contrôle comprennent notamment des prédateurs (oiseaux, mammifères), des parasitoïdes (insectes qui attaquent et tuent la tordeuse à divers stades) et des agents pathogènes. La diversité du milieu forestier influence directement celle des ennemis naturels spécifiques ou non à l'insecte. La fluctuation des populations est aussi influencée par des conditions environnementales favorables ou défavorables, notamment par des variations météorologiques stochastiques qui agissent directement sur l'insecte, sur ses hôtes ou sur ses ennemis naturels, de même que par des variations dans les effets produits par ses ennemis naturels (Cooke, Nealis et Régnière, 2007). Le climat a un rôle important à jouer dans la distribution de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, car il a une influence directe sur sa survie, et indirecte sur la distribution de ses hôtes. Le cycle relativement régulier des épidémies observé au cours des derniers siècles serait donc régulé par ces différentes interactions.

Les oscillations de populations sont généralement synchrones sur de vastes territoires. Les premiers endroits où l'on observe des fluctuations à la hausse ne sont donc pas à l'origine du déclenchement d'une épidémie généralisée, mais seraient plutôt le résultat de conditions favorables qui sont apparues plus tôt dans ces endroits. Certaines études laissent croire qu'au-delà d'un certain seuil, le succès de reproduction de certaines populations locales augmente de façon telle que des migrations de papillons permettent aux populations environnantes d'atteindre ce seuil, contribuant ainsi à la synchronisation des hausses de populations (Régnière, 2014). Il n'a toutefois pas encore été démontré que l'éradication de ces premières populations aurait pour effet d'éviter que d'autres populations augmentent ailleurs sur le territoire. De plus, il n'est pas nécessaire d'être en présence de vieilles forêts vulnérables pour connaître un épisode d'épidémie. La plupart des endroits touchés au début des épidémies passées étaient situés dans des milieux diversifiés, généralement des forêts mixtes et multiâges ayant en commun la présence d'épinettes blanches.

1.3 Susceptibilité

Il importe de bien distinguer la *susceptibilité* de la *vulnérabilité*. **La susceptibilité exprime la probabilité qu'un arbre subisse une défoliation¹ sans nécessairement en mourir.** En période d'épidémie, il arrive qu'on trouve la tordeuse des bourgeons de l'épinette sur plusieurs essences lorsque les populations sont très élevées, mais on ne peut considérer comme susceptibles que les essences sur lesquelles l'insecte peut compléter son cycle annuel. Au Québec, seulement quatre essences indigènes sont susceptibles de subir une défoliation causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette, soit **l'épinette blanche, le sapin baumier, l'épinette rouge et l'épinette noire**. S'ajoute à cette liste **l'épinette de Norvège**, une espèce exotique. Généralement, on considère que les deux premières essences ont une plus grande susceptibilité, puisqu'on y observe plus rapidement des montées de populations. À cet égard, l'épinette blanche semble plus susceptible que le sapin, puisqu'elle présente souvent les premiers signes de montées de populations et de défoliation. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle l'insecte porte ce nom.

1. Le lecteur peut consulter l'annexe A pour avoir plus d'informations sur les termes « défoliation », « mortalité » et « épidémie » utilisés dans le présent guide.

La notion de susceptibilité s'applique également à l'échelle du peuplement et du territoire. Les peuplements susceptibles sont ceux qui contiennent au moins une essence susceptible. Quant au territoire susceptible à la tordeuse des bourgeons de l'épinette, il est la résultante de l'aire de distribution de cet insecte, combinée à l'aire de distribution de ses hôtes. Le territoire couvert par la défoliation de 1938 à 2012 (figure 2) permet d'illustrer les zones où la probabilité d'observer la défoliation causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette est la plus élevée, à des degrés différents. Il est important de noter que le nombre d'années de défoliation n'est pas nécessairement en corrélation avec la gravité des impacts qui en ont découlé, notamment en raison de la variabilité de la vulnérabilité des forêts touchées.

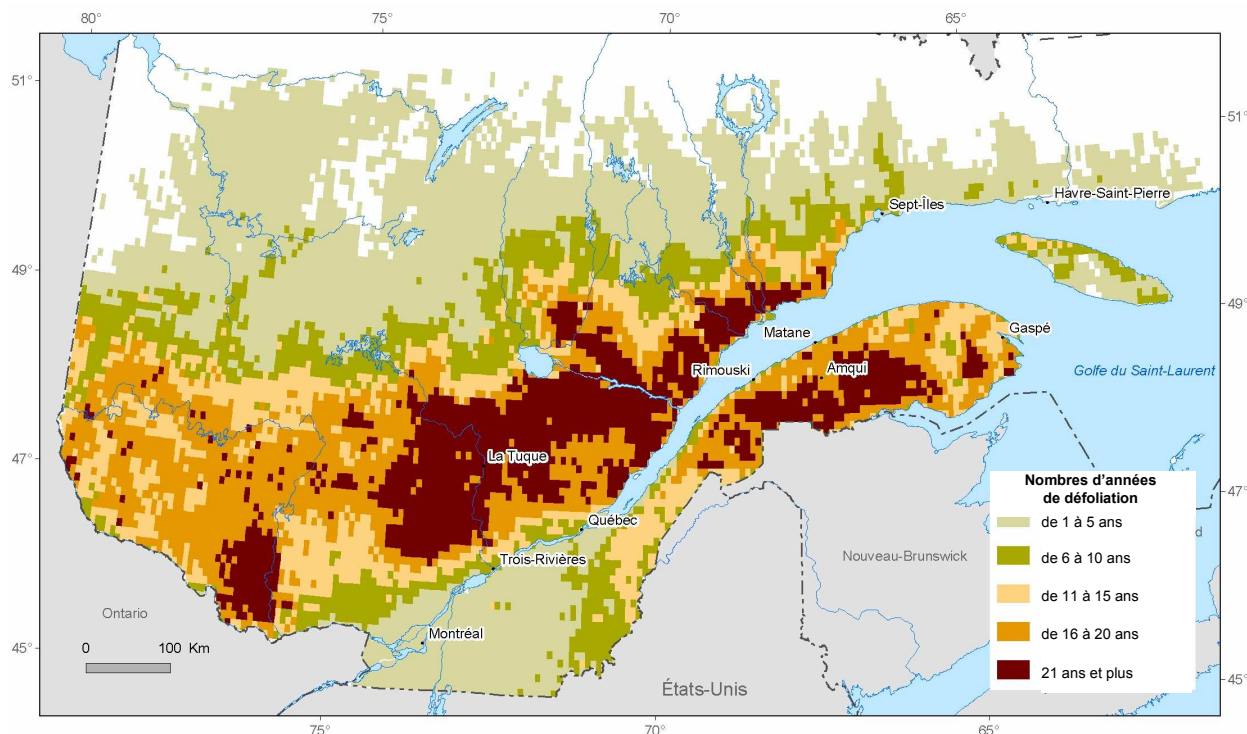


Figure 2 Territoire susceptible de subir de la défoliation par la tordeuse des bourgeons de l'épinette, déterminé à l'aide des données historiques de la défoliation de 1938 à 2012

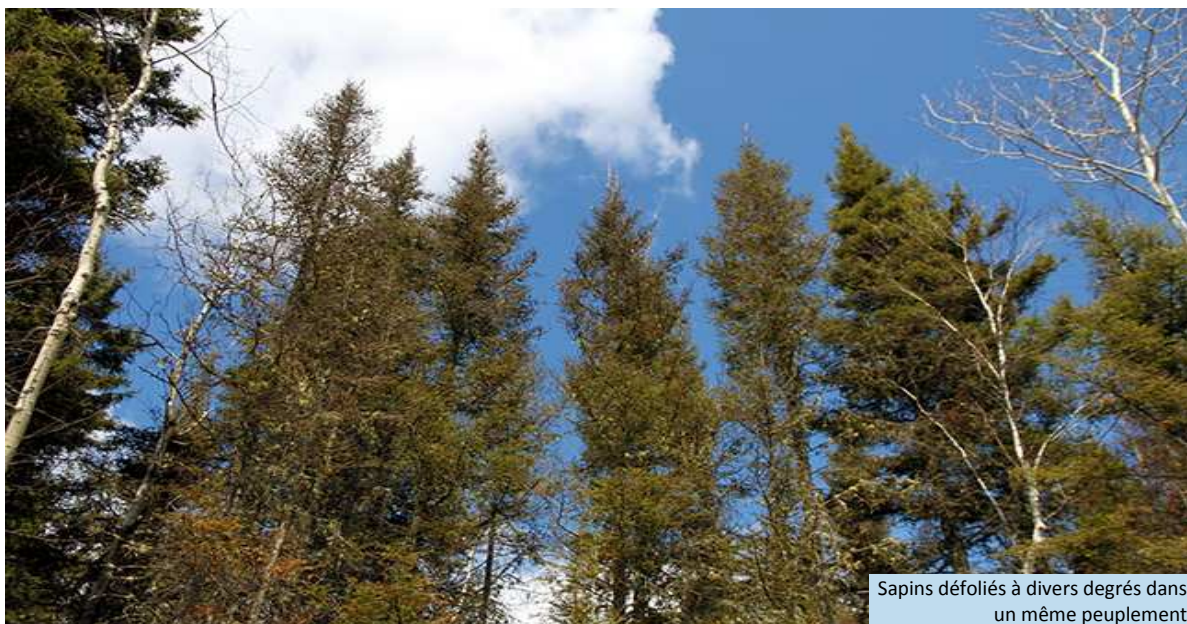
1.4 Vulnérabilité

La vulnérabilité exprime la probabilité que les arbres meurent après plusieurs années rapprochées de défoliation grave causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette. De façon générale, la vulnérabilité est la résultante des conditions qui favorisent ou défavorisent des défoliations répétées et de la capacité de l'arbre à y survivre. La notion de vulnérabilité s'applique d'abord à l'échelle de l'arbre et peut, par extension, s'appliquer à l'échelle du peuplement ou d'un territoire.

1.4.1 À l'échelle de l'arbre

On considère que les quatre essences indigènes susceptibles peuvent être vulnérables à des degrés différents. **L'ordre décroissant de vulnérabilité des essences est le suivant : sapin baumier, épinette blanche, épinette rouge et épinette noire.** D'après la revue de littérature effectuée par MacLean (1980), le sapin baumier est de loin l'espèce la plus vulnérable¹. Le statut de vulnérabilité de l'épinette de Norvège est peu documenté, mais il semble s'apparenter à celui des épinettes rouge et noire.

Certaines caractéristiques morphologiques et physiologiques contribuent à différencier la vulnérabilité des essences les plus susceptibles. L'épinette blanche a un feuillage (masse foliaire) plus important que le sapin. Annuellement, elle produit plus de feuillage par pousse et davantage de pousses. De plus, l'épinette blanche conserve son feuillage pendant un plus grand nombre d'années. À cet avantage morphologique s'ajoute un avantage physiologique. La lignification des pousses annuelles est plus hâtive chez l'épinette blanche et le taux de fibres est plus élevé dans les aiguilles. Cela rend la nourriture moins intéressante pour la tordeuse qui est alors parvenue à la période où elle en consomme le plus². Il est aussi reconnu que l'épinette blanche a une plus grande longévité que le sapin. Plusieurs des analyses par dendrochronologie réalisées pour reconstituer l'histoire des épidémies ont été faites à l'aide d'épinettes blanches ayant survécu à plusieurs épidémies. Certains auteurs ont toutefois rapporté des taux de mortalité pouvant atteindre de 40 à 50 % pour l'épinette blanche. Quoique réellement observés, ces taux ne peuvent être généralisés puisqu'ils ont été mesurés dans des contextes particuliers. Des données provenant des inventaires forestiers décennaux du Québec ne montrent pas de changements importants et généralisés des volumes d'épinette blanche après la dernière épidémie (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2009). Au Québec, c'est le dendroctone de l'épinette qui cause périodiquement le plus de mortalité chez l'épinette blanche. Cela se produit généralement lorsque les épinettes ont dépassé l'âge



Sapins défoliés à divers degrés dans un même peuplement

1. Plusieurs publications ultérieures vont dans le même sens, celles de Blais et Archambault (1982) et de Hennigar et autres (2008) en font partie, mais la liste est beaucoup plus longue.
2. L'annexe B présente le cycle de vie annuel de la tordeuse des bourgeons de l'épinette.

de la maturité ou qu'elles subissent un stress qui les rend incapables de résister aux attaques de l'insecte.

Les épinettes rouge et noire peuvent aussi mourir à la suite de défoliations graves, répétées pendant plusieurs années, mais cette probabilité est beaucoup plus faible que chez le sapin, en raison du manque de synchronisme entre le débourrement des pousses et la sortie des larves de leur période d'hibernation (Nealis et Régnière, 2004). En effet, le décalage d'environ deux semaines entre l'éclosion des bourgeons des épinettes rouge et noire et celle du sapin et de l'épinette blanche oblige les jeunes larves à se nourrir plus longtemps du vieux feuillage dont la qualité nutritive est moindre, ce qui augmente leur taux de mortalité. À cela, s'ajoute la mort des larves qui se déplacent en quête d'une meilleure source de nourriture. La mort de ces arbres est principalement observée chez ceux qui occupent l'étage inférieur de la canopée ou qui sont déjà affaiblis pour d'autres raisons.

L'âge ou plus précisément la maturité des arbres est le deuxième facteur qui influence le plus leur vulnérabilité (MacLean, 1980). Ainsi, la plus grande vulnérabilité des sapins âgés est liée à plusieurs facteurs : 1) une production accrue de fleurs qui constituent la source de nourriture de prédilection de la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans les premiers stades larvaires; 2) une moins grande quantité de réserve nutritive; 3) des « coûts fixes » de plus en plus importants pour simplement demeurer en vie. Les deux derniers facteurs expliquent une tolérance à la défoliation et une capacité de reprise moins grandes, même lorsque la défoliation cesse. Comme la maturité des arbres est fortement conditionnée par le climat, ils n'atteignent pas la maturité au même moment partout. Au Québec, le gradient latitudinal reflète bien cette réalité. Par exemple, un sapin peut parvenir à maturité à 50 ans dans le sud du Québec et à 90 ans dans le nord. L'évaluation de la vulnérabilité doit donc tenir compte de ces écarts.

1.4.2 À l'échelle du peuplement

En plus de l'âge des arbres et de la composition forestière, des facteurs générant un état de stress physiologique, dont la densité des peuplements et la qualité des sites, influencent la vulnérabilité des peuplements à la tordeuse des bourgeons de l'épinette.

Composition forestière

La proportion de sapin dans un peuplement est le premier indicateur de sa vulnérabilité potentielle. Les sapinières pures sont potentiellement plus vulnérables que les peuplements dans lesquels le sapin est combiné à des espèces qui sont moins vulnérables ou qui ne le sont pas. Dans le premier cas, une défoliation grave répétée peut entraîner la mort de tous les arbres et la réinitialisation du peuplement alors que, dans le second cas, les essences compagnes vont survivre et permettre au peuplement de conserver les attributs d'une forêt plus âgée (ex. : structure irrégulière, gros arbres morts et trouées).

Densité des peuplements

La forte densité des peuplements contribue à augmenter la vulnérabilité en amoindrissant la masse de feuillage par arbre (proportion de houppier et réserve nutritive plus faibles), les rendant ainsi moins tolérants à la défoliation répétée. Les arbres dominés, intermédiaires et codominants ont souvent une faible proportion de houppier et sont d'ailleurs les premiers à succomber à la suite de défoliations graves répétées (Baskerville, 1983).

Qualité du site

Plusieurs auteurs se sont intéressés aux caractéristiques des sites pour expliquer la vulnérabilité des peuplements à la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Les auteurs de certaines études mentionnent un effet du site sur la mort des arbres (Archambault et autres, 1990; Dupont, Bélanger et Bousquet, 1991; Ghent, Fraser et Thomas, 1957) alors que d'autres ne peuvent conclure à son influence (Bergeron et autres, 1995; MacLean et MacKinnon, 1997; MacLean et Ostaff, 1989; Lynch et Witter, 1985). À partir des différentes études consultées et des observations faites lors des dernières épidémies, les auteurs du présent document ont considéré, malgré l'absence de consensus, l'effet du site dans l'évaluation de la vulnérabilité. Cette décision se fonde sur la relation entre la capacité du site à pourvoir les arbres en eau et en éléments nutritifs, et son influence sur leur vigueur et leur résistance à des défoliations répétées.



Cette photo témoigne de la plus grande vulnérabilité des sapins (grisâtres) par rapport aux épinettes (toujours vertes).

1.4.3 À l'échelle d'un territoire

À cette échelle, la vulnérabilité est conditionnée par l'environnement forestier général. Une plus grande variété de peuplements, y compris des peuplements avec une composante de feuillus, aurait une influence sur la dynamique des populations, par exemple en réduisant la capacité de l'insecte à localiser ses hôtes et en augmentant l'abondance de ses ennemis naturels. À cette échelle, l'altitude joue aussi un rôle sur la probabilité de connaître des périodes prolongées de défoliation grave (Blais, 1964, 1965 et 1985; données provenant des relevés aériens et des inventaires forestiers du MFFP). On a observé des périodes de défoliation plus courtes à des altitudes plus élevées du sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'Est, notamment

dans les sous-régions écologiques septentrionales des massifs du lac Jacques-Cartier et des monts Valin ainsi que du haut massif gaspésien. Cet aspect doit être considéré dans l'évaluation du risque de mortalité.

La figure 3 illustre la vulnérabilité des forêts, à l'échelle du Québec, face à la tordeuse des bourgeons de l'épinette lors de l'épidémie de 1967 à 1992 (superficie en rouge et orange). On peut y observer les territoires les plus touchés par la mortalité des arbres (sur plus de 25 % de la surface terrière des peuplements) causée par les épidémies d'insectes. Il importe toutefois de savoir que cette carte inclut l'empreinte de deux épidémies de l'arpenteuse de la pruche qui ont touché l'île d'Anticosti et la Basse-Côte-Nord.

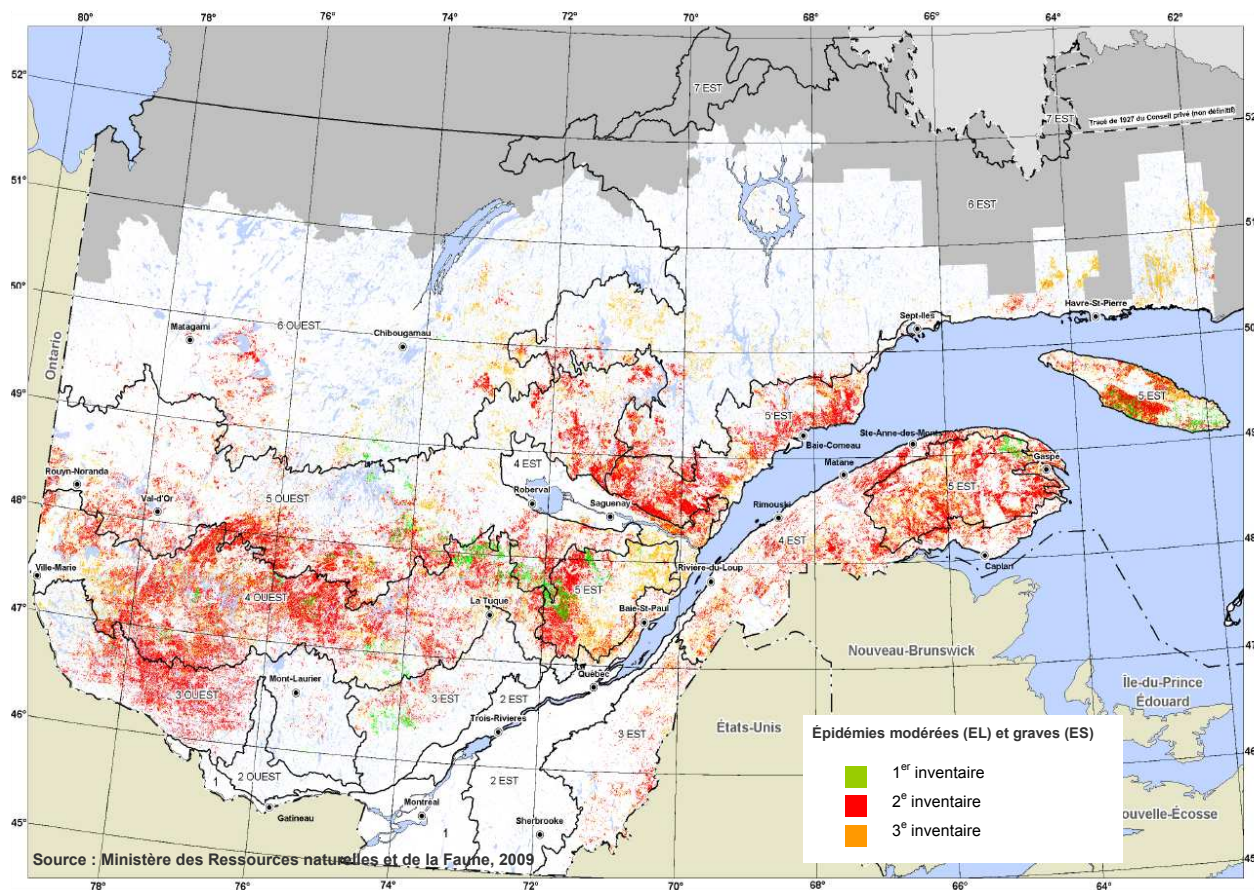


Figure 3 Territoire forestier vulnérable à la tordeuse des bourgeons de l'épinette lors de l'épidémie de 1967-1992, déterminé à partir de la mortalité partielle et totale observée au terme de cette épidémie (2^e et 3^e inventaires)

En comparant les figures 2 et 3, on constate que le territoire touché par la mortalité est beaucoup plus petit que celui touché par la défoliation; il recoupe surtout le territoire qui a connu le plus grand nombre d'années de défoliation durant la période d'observation (en général 11 ans et plus). Bien que cet aspect ne soit pas illustré ici, il faut mentionner que les superficies reconnues comme étant vulnérables comprennent une plus grande proportion de peuplements touchés par des épidémies modérées (perturbation partielle) que par des épidémies graves (réinitialisation).

1.5 Déroulement d'une épidémie et progression de la mortalité

La description du déroulement d'une épidémie proposée dans ce guide a été développée pour aider les forestiers à synchroniser leurs interventions en fonction de la fluctuation des populations de la tordeuse des bourgeons de l'épinette et de ses conséquences (tableau 1). Le cycle de l'épidémie, d'une durée de trente à quarante ans, est divisé en deux grandes périodes, l'endémie et l'épidémie, qui sont à leur tour subdivisées en phases. Pour la période d'endémie, trois phases ont été déterminées : la préépidémie, la post-épidémie et l'endémie stable. La période d'épidémie a été subdivisée en deux phases : la défoliation des arbres sans mortalité et avec mortalité.

Tableau 1 Description des cinq phases associées aux périodes d'épidémie et d'endémie en fonction de trois indicateurs : les populations de l'insecte, la défoliation et la mortalité des arbres^a

Période	ENDÉMIE	ÉPIDÉMIE		ENDÉMIE		
Phase	Préépidémie	Sans mortalité	Avec mortalité	Post-épidémie	Stable	
Population de l'insecte	Faible, mais à la hausse, et mesurable	Élevée et facilement mesurable	Élevée et facilement mesurable	Mesurable, mais en forte baisse	Très faible, difficile à détecter et à mesurer	Très faible, difficile à détecter et à mesurer
Défoliation annuelle	Faible, mais détectable au sol	Facilement détectable par relevés aériens	Facilement détectable par relevés aériens	Pratiquement absente	Absente	Absente
Défoliation totale	Nulle	Moins de 50 %	Très variable et allant jusqu'à 100 %	Reprise progressive des survivants	Nulle	Nulle
Mortalité des arbres	Les traces des arbres morts lors de l'épidémie précédente sont difficilement perceptibles.	Peu ou pas de nouveaux arbres morts liés à la défoliation	La mortalité débute lentement, puis progresse rapidement. Elle est facilement repérable à partir du sol ou des airs (observations visuelles, photographies aériennes, télédétection). Le processus de dégradation du bois se met en place progressivement.	Les arbres trop affaiblis continuent de mourir.	Les arbres morts peuvent persister debout pendant plusieurs années et ils tombent progressivement.	Les arbres morts lors de la période d'épidémie sont pour la plupart au sol et dans un état avancé de dégradation.
Durée approximative de la phase	De 3 à 4 ans	De 4 à 5 ans	De 5 à 7 ans	De 3 à 4 ans	De 15 à 20 ans	
Durée du cycle	De 30 à 40 ans					

a. Les colonnes entourées d'une ligne rouge correspondent aux phases où la mort des arbres est liée à une défoliation répétée.

1.5.1 Période d'endémie

Tout au long de la période d'endémie, la défoliation est négligeable (c.-à-d. peu ou pas perceptible). La **phase d'endémie stable** est caractérisée par des densités de population très faibles, difficiles à mesurer, voire à détecter. La **phase de préépidémie** est caractérisée par des populations en hausse et mesurables, ce qui laisse présager une épidémie imminente. Au

cours de la **phase de post-épidémie**, les populations sont en baisse, la défoliation annuelle est peu apparente, mais des arbres affaiblis par la défoliation répétée continuent de mourir. La détermination du passage d'une phase à l'autre n'est cependant pas toujours facile à apprécier et peut demander l'avis de spécialistes.

1.5.2 Période d'épidémie

La période d'épidémie peut être subdivisée en fonction de l'effet cumulé de la défoliation sur les arbres. Elle débute par une **phase de défoliation sans mortalité** qui englobe la période de temps durant laquelle la défoliation des pousses annuelles se répète avant l'apparition de la mortalité et sa progression rapide. La **phase de défoliation avec mortalité** lui succède à partir du moment où l'on observe une proportion plus importante et une progression rapide de la mortalité, associées à une défoliation cumulative, c'est-à-dire à une défoliation annuelle importante qui se répète pendant plusieurs années. La défoliation annuelle grave peut se produire avec ou sans interruption. Par ailleurs, ces deux phases ne sont pas présentes partout sur le territoire québécois. **Une phase de défoliation avec mortalité demande au moins quatre à cinq années rapprochées de défoliations annuelles graves, ce qui ne se produit habituellement que sur une faible portion du territoire touché par de la défoliation à un moment ou l'autre de l'épidémie.**

La variabilité dans la durée de l'épidémie est illustrée dans les graphiques de la figure 4, produits à l'aide de données provenant des archives du MFFP et qui portent sur l'étendue et la gravité de la défoliation annuelle causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette depuis 1938. Ces informations permettent d'établir le profil complet des deux dernières épidémies tant à l'échelle du Québec qu'à l'échelle régionale. Les subdivisions des sous-domaines bioclimatiques ont été utilisées à cette fin (figure 5).

L'importance relative des superficies touchées chaque année de même que la gravité des dommages annuels sont les deux indicateurs qui ont été utilisés pour illustrer les disparités régionales et temporelles. On remarque que les deux indicateurs présentent généralement des valeurs différentes d'un sous-domaine et d'une épidémie à l'autre. De plus, on constate que les indicateurs sont plus faibles dans les domaines de l'érablière et de la pessière à mousses. La plus forte proportion de peuplements vulnérables se trouve dans les sous-domaines de l'Est de la sapinière, de la pessière et de l'érablière à bouleau jaune.



Défoliation grave des pousses annuelles des deux dernières années de croissance

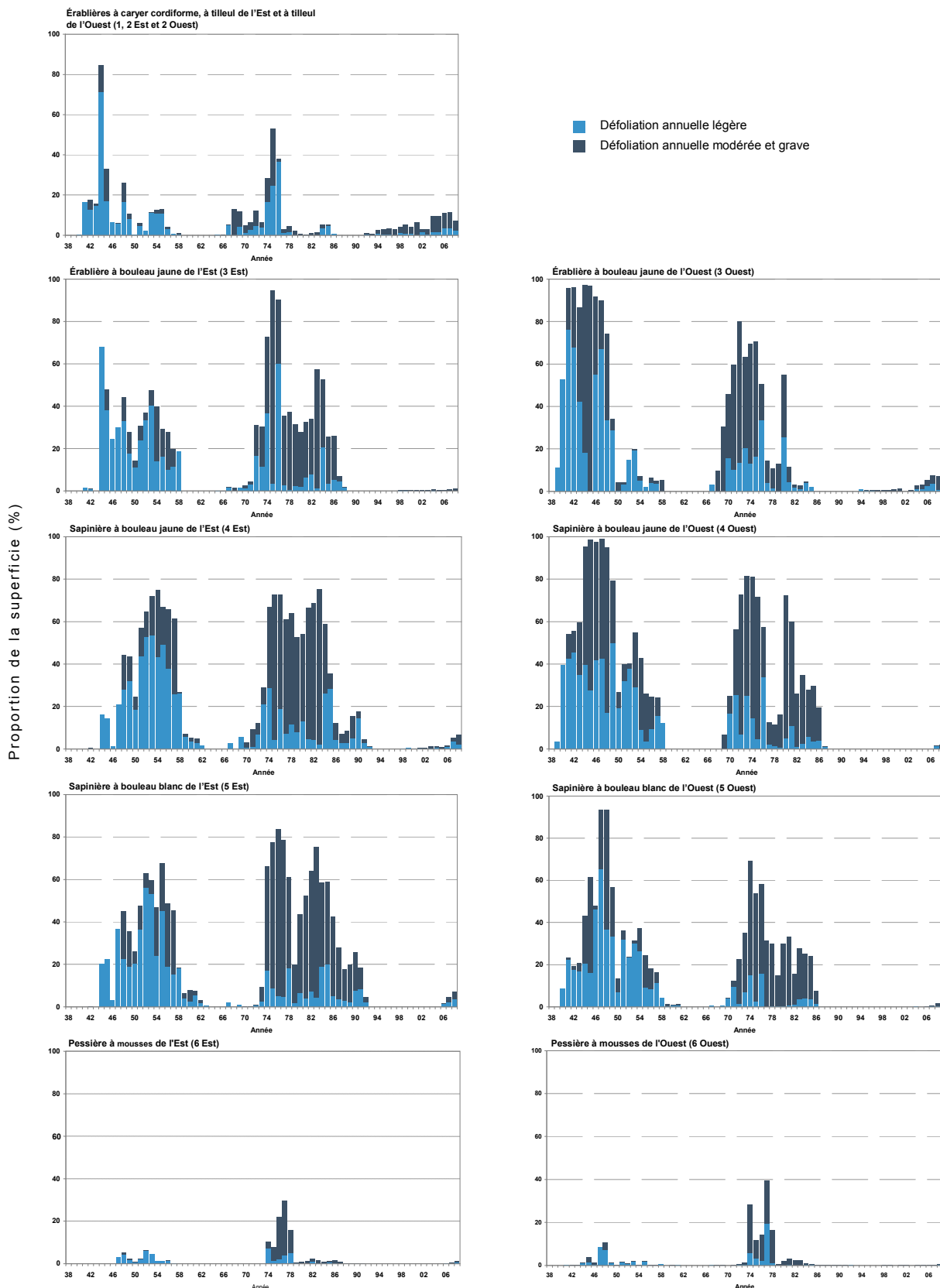


Figure 4 Étendue et gravité des défoliations annuelles causées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec, de 1938 à 2008, par sous-domaine bioclimatique

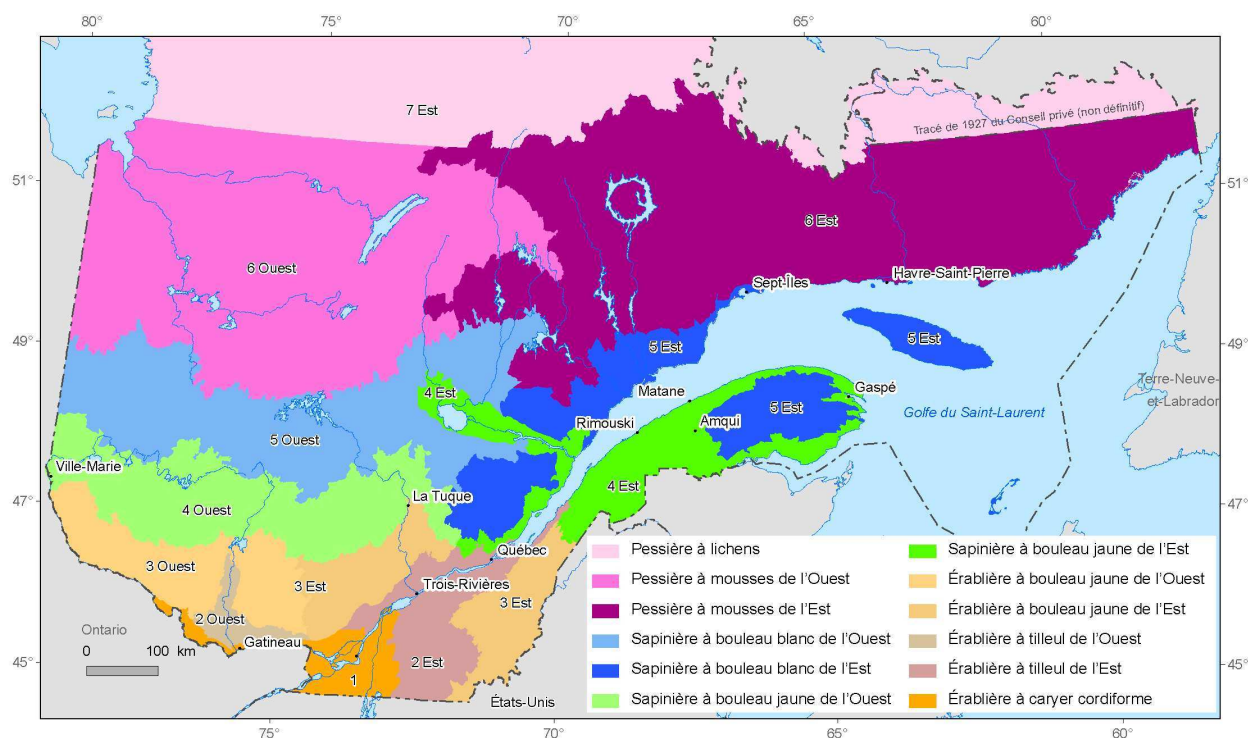


Figure 5 Domaines et sous-domaines bioclimatiques du Québec méridional

Ce qu'il est important de noter au cours du déroulement d'une épidémie, c'est la fréquence et la gravité de la défoliation engendrée par l'insecte à un endroit donné. Les caractéristiques des arbres, des peuplements et des territoires d'intérêt, combinées aux indices de gravité de l'épidémie, vont permettre d'en anticiper les effets à court terme, notamment la mort des arbres et leur dégradation subséquente.

Les premiers signes d'épidémie apparaissent à la tête des arbres lors de la première année de défoliation des pousses annuelles. Si une défoliation grave se généralise, les arbres défoliés prendront une teinte de plus en plus grisâtre. La figure 6 présente un patron typique de progression de la mortalité dans une sapinière vulnérable. Ce modèle est fondé sur des mesures faites lors de la dernière épidémie dans des aires d'observation situées dans les sous-domaines de la sapinière de l'Est. La mortalité débute généralement vers la quatrième année de défoliation grave des pousses annuelles, culmine vers la neuvième année et cesse environ deux à trois ans après l'épidémie, soit vers la douzième année. On peut constater qu'à l'échelle d'un peuplement, environ 90 % du volume vulnérable peut être encore constitué d'arbres vivants, et ce, six ans après le début de l'épidémie. Généralement, les premiers arbres qui meurent dans un peuplement sont les dominés et les intermédiaires (Baskerville, 1983; Baskerville et MacLean, 1979). Ils sont souvent peu vigoureux et ont une faible proportion de houppier. De plus, ils sont envahis et défoliés par les chenilles provenant des arbres qui les surplombent. Les arbres codominants ayant une faible proportion de houppier ne vont pas tarder à mourir aussi. Il est difficile de caractériser les arbres qui vont mourir par la suite. Quoiqu'il puisse y avoir des situations où la mortalité progresse plus rapidement, et d'autres où elle est plus lente, quatre années de défoliation grave laissent beaucoup de temps pour planifier la récolte des arbres moribonds comparativement à ce qui se produit lors des feux de forêt.

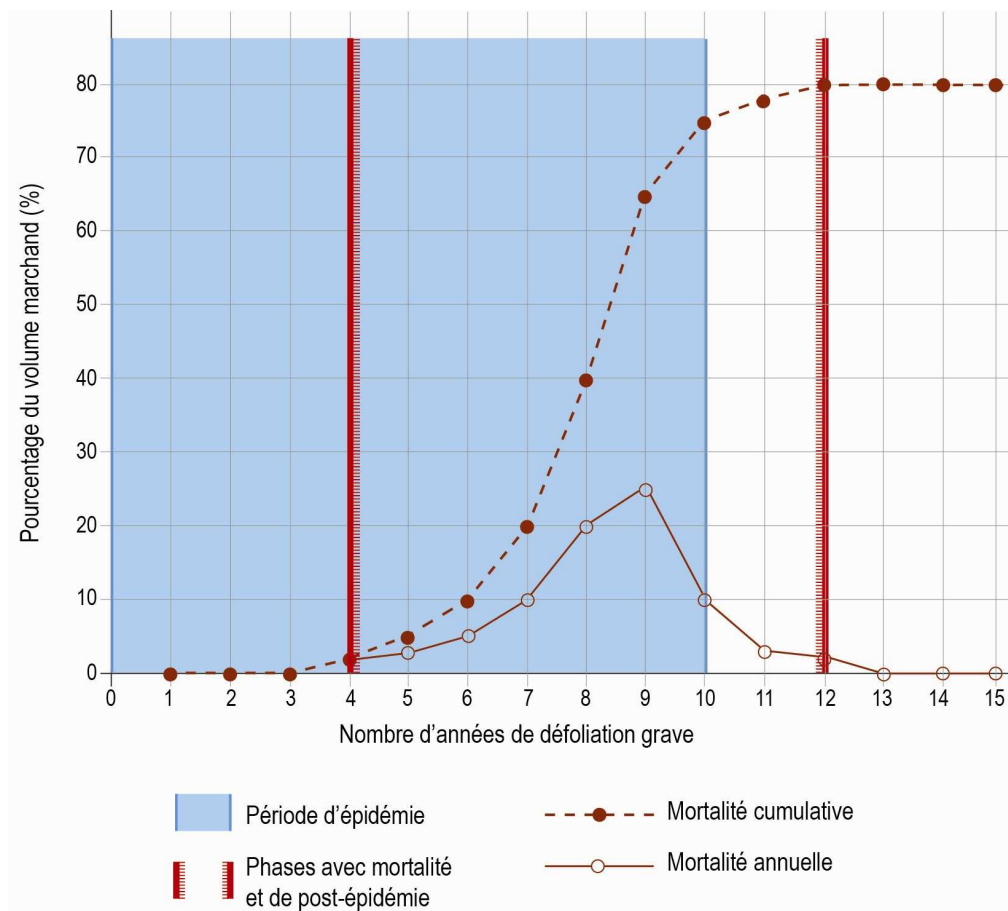


Figure 6 Modèle typique de progression de la mortalité causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans une sapinière mature (voir le tableau 1 pour une description des périodes et des phases)

1.6 Dégradation des arbres

Le processus de dégradation des arbres touchés par une épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette s'amorce souvent avant la mort de l'arbre, lorsque sa tête meurt. Il arrive d'ailleurs que des arbres dont la tête est morte survivent à l'épidémie et produisent une ou plusieurs baïonnettes. Ces blessures ont des répercussions à long terme, puisqu'elles sont des portes d'entrée pour les champignons de coloration et de carie (Lortie, 1968).

La plupart des études qui ont porté sur la dégradation des arbres tués par la tordeuse des bourgeons de l'épinette en fonction du temps écoulé depuis leur mort ont été menées à l'extérieur du Québec, notamment celles de Basham et Belyea



Cette photo témoigne des dégâts causés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette.

(1960), Stillwell et Kelly (1964), Basham (1984 et 1986) et Wall (1988). La proportion d'arbres morts debout et entiers dans un peuplement sert d'indicateur sur l'état de dégradation des arbres morts. La figure 7 permet de visualiser la proportion des arbres qui étaient encore debout et entiers, mesurée selon le nombre d'années écoulées depuis leur mort, d'après deux études non publiées, réalisées par le MFFP lors de la dernière épidémie. Les sapins baumiers analysés ont été répartis en cinq classes : arbres morts depuis moins d'un an (1), un à deux ans (2), deux à trois ans (3), trois à quatre ans (4) et quatre à cinq ans (5). On peut observer une accélération de la dégradation à partir de la troisième année.

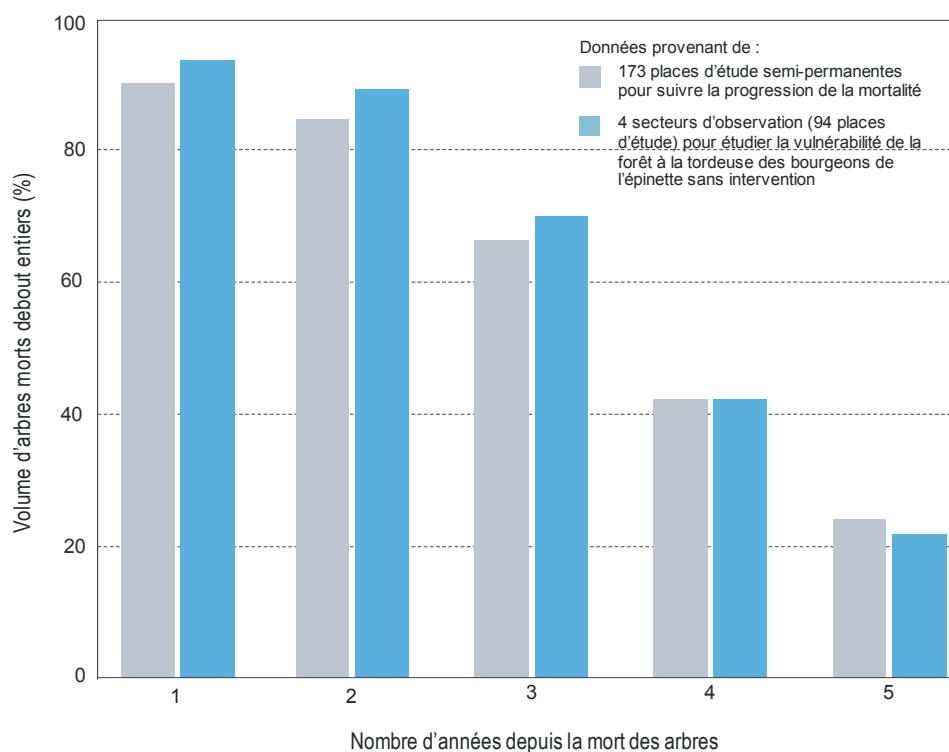


Figure 7 Proportion d'arbres demeurant debout et entiers entre un et cinq ans après leur mort causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette

Au Québec, une autre étude non publiée portant sur la dégradation du sapin a été réalisée par le MFFP au cours des années 1980. Ces résultats sont utilisés pour illustrer le processus de dégradation, puisqu'ils semblent mieux représenter notre situation que ceux des études menées ailleurs au Canada, quoiqu'ils aillent généralement dans le même sens. Lors de cette étude, des sapins baumiers répartis également en six classes (les mêmes que celles mentionnées précédemment auxquelles on a ajouté une classe d'arbres moribonds [0]) ont été abattus et des échantillons ont été prélevés pour être analysés en laboratoire (figure 8). Les observations ont porté sur les agents de dégradation (insectes et champignons) de même que sur la coloration et la carie de l'aubier et du bois de cœur. Les insectes trouvés dans l'écorce, sous l'écorce ainsi que dans l'aubier et le bois de cœur ont été dénombrés et identifiés.

La figure 8 illustre la succession des insectes xylophages dans le temps. Les *Curculionidae*, surtout présents chez les arbres moribonds, ne le sont plus lorsque les arbres sont morts depuis plus de deux ans. On trouve les *Scolytidae* plus souvent chez les arbres qui viennent de

mourir, bien qu'on puisse aussi en trouver chez les arbres moribonds jusqu'à deux ans après leur mort. Ces deux familles d'insectes n'endommagent pas le bois, puisque leur présence est limitée à l'écorce et à la surface du bois. Deux autres familles apparaissent en même temps que les *Scolytidae*, soit les *Melandryidae* et les *Siricidae*. On trouve ces insectes dans les arbres jusqu'à trois ans après la mort de ceux-ci. Leur présence se limite à l'aubier et les galeries qu'ils creusent ne diminuent pas vraiment la valeur du bois. Enfin, les *Cerambycidae* colonisent aussi les arbres moribonds, mais ils sont plus nombreux un an après la mort de ceux-ci. Comme ils ont généralement un cycle vital de deux ans, échelonné sur trois ans, ils ont été observés dans toutes les classes d'arbres morts. Ce sont eux qui entraînent la plus grande dépréciation du bois scié dès la deuxième année après la mort, en raison des galeries sinueuses et longitudinales qu'ils creusent pour se nourrir, souvent jusqu'au cœur de l'arbre. La dépréciation des tiges augmente en fonction de la densité des galeries et de leur profondeur.

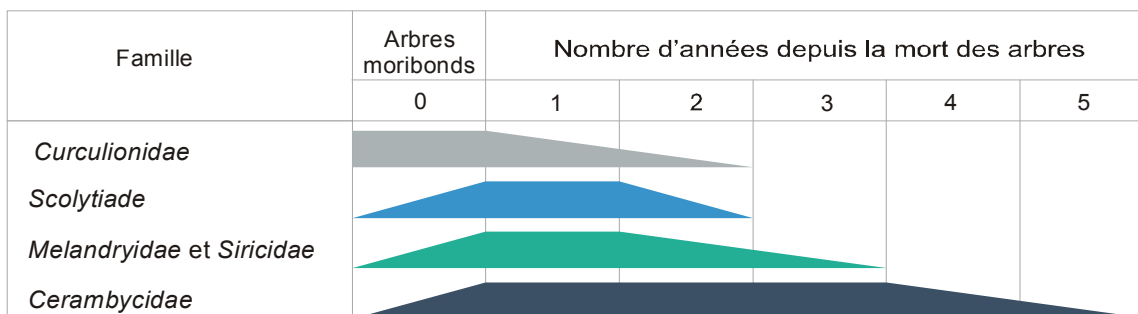


Figure 8 Succession des insectes xylophages chez des arbres moribonds et morts depuis un à cinq ans

Quoiqu'ils ne causent pas tous des dommages au bois, les insectes xylophages peuvent favoriser la contamination des arbres par les champignons responsables de la dégradation du bois. Il a été démontré que les *Siricidae* sont directement responsables de la pénétration de champignons dans l'aubier.

Plusieurs espèces de champignons ont été identifiées au cours de l'étude. Les premières espèces causent la coloration de l'aubier (figure 9) et ouvrent la voie à d'autres espèces qui sont responsables de sa carie. Au cours de cette étude, on a mesuré la coloration et la carie de l'aubier et celles du bois de cœur. Dans la figure 10, on peut noter que la coloration de l'aubier est présente chez les arbres moribonds et plafonne lorsqu'elle atteint entre 10 et 20 % du volume alors que la carie lui succède. Cette dernière apparaît chez les arbres morts depuis plus d'un an et progresse au rythme d'environ 10 % du volume par année pour plafonner à environ 30 % entre 3 et 4 ans après la mort des arbres (classe 4). Cette proportion correspond à la proportion de

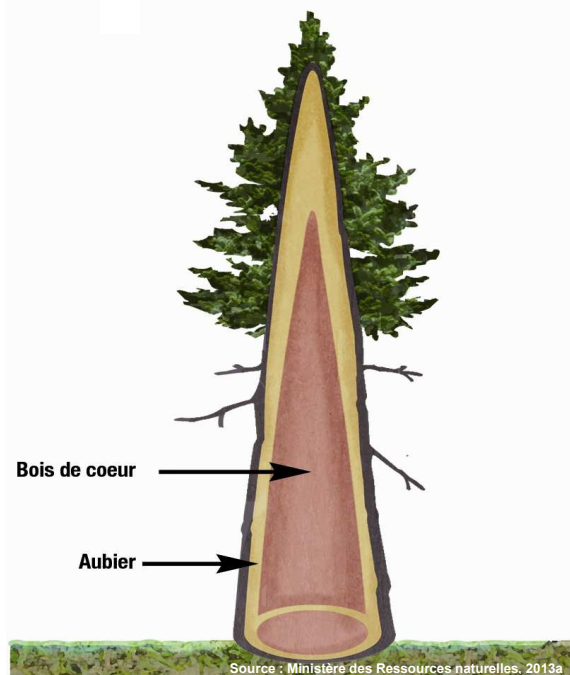


Figure 9 Illustration de l'aubier et du bois de cœur d'un arbre

l'aubier dans l'arbre. Comme celle-ci est plus élevée lorsque le rythme de croissance des arbres est plus rapide, on peut avoir une idée de l'incidence possible de la carie à partir de cet indicateur. Le taux de dégradation de l'arbre est en quelque sorte inversement proportionnel à son rythme de croissance pendant les dernières années de sa vie. Quant à la coloration et à la carie du bois de cœur, elles ne progressent à peu près pas après la mort de l'arbre et demeurent inférieures à 10 %.

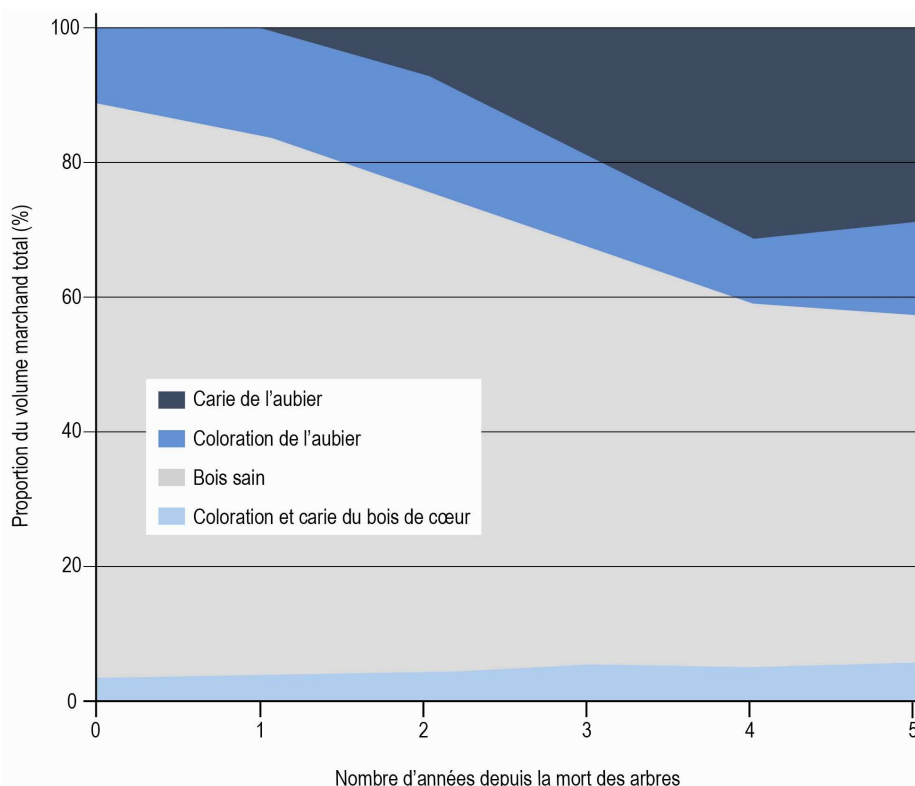


Figure 10 Évolution de la coloration et de la carie de l'aubier et du bois de cœur pour des sapins moribonds (0) et des sapins morts depuis un à cinq ans

La coloration de l'aubier serait principalement causée par l'*Amylostereum chailletii* qui n'altère pas la fermeté du bois. Dans la majorité des cas, la carie de l'aubier serait une carie blanche attribuable au *Polyporus abietinus* (Basham, 1986). On peut distinguer trois stades de dégradation en fonction de la fermeté du bois : débutante (*incipient*), moyenne (*moderate*) et avancée (*advanced*), le bois de la carie débutante étant légèrement plus mou que le bois sain, et celui de la carie avancée se désintégrant facilement. Puisque la carie blanche attaque principalement la lignine du bois, ce n'est pas nécessairement un empêchement à l'utilisation du bois pour la production de pâtes et papiers. En effet, l'impact est faible lorsque le bois est réduit en pâte dans les deux ans qui suivent la mort de l'arbre, surtout si on a recours à un procédé chimique pour en extraire la cellulose (Boulet, 2003). Les pertes cumulées lors de la récolte, du transport et de l'écorçage, le faible taux d'humidité et la propension du bois carié à produire des particules fines sont autant d'éléments dont il faut tenir compte dans l'utilisation du bois carié selon les procédés de transformation et la qualité des produits désirés.

Une étude menée par Basham (1986) a démontré un lien clair, à l'échelle d'un peuplement, entre l'importance de la carie de l'aubier et la densité des populations de scolytes sous l'écorce. Une densité inférieure à un trou de scolyte par dm² d'écorce serait indicatrice d'un faible taux de

carie de l'aubier, et ce, même pour des arbres morts depuis quatre à cinq ans. Une densité supérieure à deux trous par dm^2 d'écorce permettrait, par ailleurs, de prédire un taux de carie de l'aubier important pour des arbres morts depuis deux à trois ans. Cet indicateur pourrait s'avérer utile pour établir des priorités dans la récupération du bois.

Les données présentées dans les figures 8 et 10 proviennent de sapins récoltés dans diverses régions du Québec, mais plus particulièrement dans les sous-domaines bioclimatiques de l'Ouest, donc ayant un climat plus chaud et plus sec que dans les sous-domaines de l'Est. Cela pourrait faire en sorte que le temps de dégradation ne soit pas le même dans d'autres régions. En effet, lors d'une étude similaire, on a observé une dégradation plus rapide des arbres en Ontario qu'à Terre-Neuve (Basham et autres, 1976). Ce résultat laisse supposer qu'un climat plus frais et plus humide est moins propice à une dégradation rapide.

En somme, il faut retenir de ces différentes études que plusieurs facteurs contribuent à induire une variabilité dans le processus de dégradation des sapins touchés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette et qu'il est nécessaire de se donner des repères avant d'entreprendre la récupération des arbres morts.

1.7 Détermination des périodes propices à la récolte des peuplements vulnérables

Lorsqu'on intègre les informations relatives aux agents de dégradation des arbres (figures 8 et 10) à celles sur la progression de la mortalité (figure 6), on peut obtenir une représentation du temps dont on dispose pour procéder à la récolte des peuplements vulnérables potentiellement ou réellement touchés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette.

En période d'endémie (phase stable), les activités d'aménagement devraient toujours avoir pour objectif de diminuer la vulnérabilité du territoire. Avant le début de l'épidémie (phase de préépidémie), une **récolte préventive**¹ des peuplements les plus vulnérables peut être faite (figure 11). Au début de l'épidémie (phase sans mortalité), la récolte préventive continue; elle est dictée à la fois par la vulnérabilité des peuplements et par la défoliation facilement perceptible. Après quatre à cinq ans de défoliation, on entre dans la phase avec mortalité. Pour des considérations pratiques, un seuil de l'ordre de 10 % de volume de bois mort est proposé pour différencier cette phase de la précédente. On peut alors parler de **récolte associée à une perturbation naturelle**², puisque la proportion du volume à récolter, constitué d'arbres morts, commence à être importante. L'objectif de cette récolte est donc de récupérer la valeur marchande des arbres tués ou affaiblis par l'insecte. Comme on le voit à la figure 6, on dispose d'environ quatre à cinq ans à partir de la première année de défoliation grave dans un peuplement pour amorcer ou poursuivre la récolte préventive et d'environ cinq à sept années supplémentaires pour récolter les arbres morts encore aptes à la transformation.

1. Le terme « coupe de prérécupération » a déjà été employé pour qualifier la récolte servant à limiter les pertes de matière ligneuse avant une perturbation naturelle. Ce terme est désormais considéré comme désuet (Ministère des Ressources naturelles, 2013a).

2. Le terme « coupe de récupération » a longtemps été employé pour désigner la récolte des arbres tués ou affaiblis par une perturbation naturelle. Dans le tome 2 du *Guide sylvicole du Québec* (Ministère des Ressources naturelles, 2013a), il a été remplacé par l'appellation « récolte après perturbation naturelle » qui s'applique bien au contexte d'événements entraînant une mort rapide des arbres tels qu'un feu, un chablis ou une épidémie de l'arpenteuse de la pruche. Dans le présent guide, nous utilisons plutôt l'appellation « récolte associée à une perturbation naturelle », car la mortalité causée par l'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette se poursuit pendant plusieurs années et parce que la récolte des arbres morts a lieu pendant et après la perturbation.

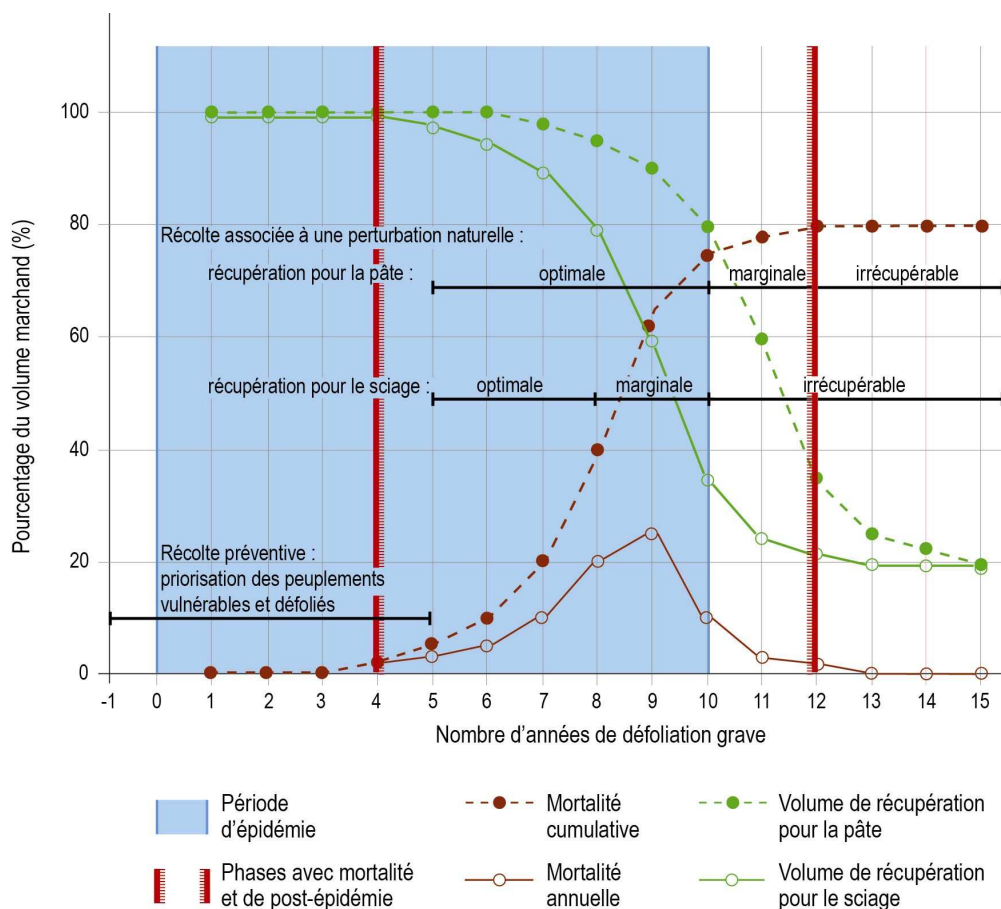


Figure 11 Période de récupération pour le sciage et la pâte pour un modèle typique de progression de la mortalité causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans une sapinière mature (voir le tableau 1 pour une description des périodes et des phases)

Les limites proposées concernent deux usages : le sciage et les pâtes et papiers. Le délai dont on dispose pour la récolte des arbres morts destinés au sciage est surtout déterminé par l'importance des dommages causés par les *Cerambycidae* (longicornes). Dans la figure 11, une première courbe a été ajoutée à celles de la figure 6 pour illustrer la proportion du volume qui est encore apte au sciage selon le temps écoulé depuis le début de l'épidémie. Par ailleurs, dans le cas des arbres qui sont destinés aux usines de pâtes et papiers, le temps dont on dispose pour récolter les arbres morts peut varier selon les procédés de transformation et les exigences du marché. La figure 7 indique que 80 % du bois est toujours sain entre deux et trois ans après la mort de l'arbre. Une deuxième courbe a donc été ajoutée pour illustrer la proportion du volume qui pourrait être encore apte à la transformation pour les usines de pâtes et papiers.

Une variable importante dont on devra tenir compte dans certains procédés de transformation est le taux d'humidité du bois. On sait toutefois que la dégradation touche essentiellement l'aubier parce que le taux d'humidité y est plus élevé au départ. C'est aussi dans cette partie de l'arbre que le taux d'humidité baisse le plus avant que n'apparaisse la carie. Dans le modèle présenté à la figure 11, les périodes dont on dispose pour procéder à la transformation des

sapins morts, selon l'usage auquel ils sont destinés, ont été qualifiées d'optimale, de marginale et d'irrécupérable, mais elles ne tiennent pas compte de la variable taux humidité.

L'information contenue dans la figure 11 est une référence fort utile pour planifier une récolte en cours d'épidémie. Toutefois, pour que son application soit adéquate, des validations doivent être faites sur le terrain.

Le tableau 2 présente un aperçu du potentiel de transformation d'un arbre déterminé à partir de son état général et de critères visuels facilement observables.

Tableau 2 Potentiel de transformation d'un arbre en fonction de son état général

État de l'arbre	Critère visuel	Potentiel de transformation
Arbre vivant	Aiguilles vertes facilement observables au centre du houppier	
Arbre vivant malgré les apparences (moribond)	Aiguilles vertes rares ou absentes, mais écorce encore saine	Arbre qui présente un potentiel de transformation pour le sciage ou les pâtes et papiers.
Arbre mort récemment (depuis moins d'un an)	Absence d'aiguilles vertes, écorce brunie à l'intérieur, mais encore fixée au tronc	
Arbre mort depuis un an ou plus	Sciure de bois au pied de l'arbre témoignant de la présence de galeries d'insectes, écorce qui se détache facilement, bois encore ferme, coloration de l'aubier, mais peu de carie.	Arbre qui présente toujours un potentiel de transformation pour le sciage ou les pâtes et papiers. Pour le sciage, les trous causés par les longicornes peuvent toutefois entraîner le déclassement des produits. Pour les pâtes et papiers, ce n'est pas tant la coloration et la carie qui peuvent en restreindre l'utilisation que le taux d'humidité inadéquat pour certains procédés de transformation.
Arbre mort depuis plus de deux ans.	Trous de pic-bois observables sur le tronc, écorce se détachant d'elle-même, aubier qui commence à devenir friable.	Une partie des arbres de grand diamètre qui ont une croissance lente peut encore être transformée parce que leur dégradation est plus lente, mais il faut s'attendre à un taux de perte plus élevé.

Lorsqu'on parle de potentiel de transformation, on ne fait pas nécessairement référence à la valeur monétaire du bois, mais plutôt à ses propriétés (par exemple, son taux d'humidité). **Avant de procéder à la récolte d'arbres morts depuis plus d'un an, il faut s'assurer de se conformer au standard de qualité des acheteurs.**

1.8 Attributs écologiques des peuplements façonnés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette

Depuis des siècles, les épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette jouent un rôle majeur dans la dynamique des écosystèmes du Québec méridional. Dans la zone de la sapinière, cette perturbation naturelle constitue même le moteur principal de la dynamique des forêts. Les épidémies s'y produisent de façon récurrente et périodique depuis une longue période. Par les divers patrons de mortalité résultant du comportement de l'insecte et de la vulnérabilité variable des arbres et des peuplements en place, elles conditionnent non seulement la composition et la structure interne des peuplements, mais elles influencent aussi la structure d'âge et l'organisation spatiale du paysage.

Lorsque ce sont tous les arbres qui meurent dans le peuplement, on assiste alors à sa réinitialisation : un nouveau peuplement va remplacer celui qui vient de mourir. Lorsque la mortalité est partielle, on observe une baisse de densité et souvent un changement de composition des peuplements. Dans les deux cas les arbres morts vont continuer de jouer des fonctions écologiques : ils contribuent notamment à maintenir la diversité de la faune vertébrée et invertébrée de même que celle de la flore, en particulier la flore muscinale, indispensable à la dégradation du bois mort. En se dégradant, les arbres morts constituent de bons lits de germination pour certaines plantes. Les troncs jonchant le sol sont autant d'abris pour la faune que pour de jeunes plantes qui y trouvent les conditions propices pour se développer. À un stade plus avancé de carie, les arbres morts viennent enrichir les sols forestiers par leur apport en matière organique.

Contrairement à l'impression générale, la majorité des peuplements subissent une mortalité partielle variable à la suite d'une épidémie, même grave. Les arbres survivants et les recrues comblent les vides laissés par les arbres morts, c'est pourquoi les traces de mortalité partielle semblent disparaître assez rapidement.

Que ce soit à la suite d'une mortalité totale ou d'une mortalité partielle, la composition des nouveaux peuplements peut varier selon les conditions du milieu et les caractéristiques du précédent peuplement, et ne correspond pas toujours aux attentes d'un point de vue humain. Toutefois, sur le plan biologique, les épidémies n'affectent pas la productivité des sites comme c'est parfois le cas lors d'un feu de forêt. La résilience des écosystèmes passe, entre autres, par leur hétérogénéité. Comme les épidémies contribuent à cette hétérogénéité, il faut cesser de n'en voir que les effets négatifs à court terme, notamment en raison de la mortalité et de la réduction de croissance qu'elles occasionnent. Il faut apprendre à considérer les effets positifs qui ne sont souvent perçus qu'à moyen ou à long terme.



CHAPITRE 2

Analyse de la vulnérabilité et suivi de l'épidémie

Compte tenu de l'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette qui sévit actuellement, et considérant son évolution possible au cours des prochaines années, il importe d'apporter des modifications à la planification des activités d'aménagement forestier. Face à l'épidémie qui progresse, il faut toutefois se garder de précipiter les choses et de tirer des conclusions trop hâtives. Comme on l'a vu dans le chapitre 1, tous les peuplements forestiers qui subissent une défoliation ne mourront pas. Dans certains cas, plusieurs années de défoliation engendreront une mortalité telle que l'ensemble du volume marchand sera affecté et un nouveau peuplement émergera après l'épidémie. Toutefois, ce scénario est loin d'être la norme. Dans de nombreux cas, la mortalité sera partielle et le peuplement survivra. Il en résultera des baisses de volume de bois, mais l'effet de la mortalité causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette sera semblable à celui d'une éclaircie plus ou moins grave, avec une réduction temporaire de croissance pour les essences susceptibles. Finalement, certains peuplements, peu vulnérables à l'insecte, seront peu modifiés ou ne le seront pas, même si une défoliation peut parfois s'y produire au cours de l'épidémie. Devant la variété des possibilités, le défi pour le sylviculteur consiste à bien mesurer les risques de mortalité afin de circonscrire ses actions, dans l'espace et dans le temps, pour minimiser les conséquences néfastes que pourrait avoir l'épidémie sur la récolte de bois, tout en évitant de répéter les erreurs du passé.

Pour ce faire, il est essentiel de tenir compte de l'évolution de la situation et d'avoir une compréhension fine des effets réels ou probables de l'épidémie. La démarche proposée dans ce guide comporte quatre grandes étapes qui vont permettre l'application d'orientations sylvicoles adaptées au contexte d'une épidémie imminente ou en cours.

- 1) La première étape consiste à **évaluer la vulnérabilité de la forêt**. Cette étape devrait être répétée régulièrement en période d'endémie afin de prendre en compte l'évolution du milieu. Au début de la période d'épidémie, elle devient incontournable, puisqu'elle permet de déterminer les peuplements qui présentent le plus de risques de connaître une baisse importante de volume après le passage d'une épidémie grave ainsi que ceux qui devraient se maintenir et conserver leur valeur actuelle ou potentielle. Un des outils actuellement disponibles pour faire cette évaluation a été développé au début des années 1990 (Gagnon et Chabot, 1991). Quoiqu'il soit toujours valable, une nouvelle méthode de classification, basée sur les connaissances les plus récentes, a été développée pour un guide destiné aux aménagistes de la forêt publique. Les fondements de cette méthode sont applicables à la forêt privée, c'est pourquoi elle est expliquée en détail à la section 2.1.
- 2) La deuxième étape consiste à **déterminer dans quelle période et dans quelle phase du cycle de la tordeuse se trouve le territoire** pour lequel on veut évaluer la nécessité d'apporter des ajustements aux activités d'aménagement forestier. Cette analyse donne aussi des indications sur le temps dont on dispose pour récolter les arbres et les peuplements les plus à risque (étape 1) ainsi que le meilleur moment pour le faire, en s'appuyant sur les connaissances relatives à la progression de la mortalité et à la dégradation du bois présentées dans le chapitre 1.
- 3) La troisième étape consiste à **associer les orientations sylvicoles du chapitre 3 aux diverses situations** décrites aux étapes 1 et 2.

- 4) La quatrième étape consiste à **vérifier la faisabilité des ajustements à apporter**. D'une part, on devra s'assurer de la disponibilité des marchés pour les volumes à récolter dans un contexte d'épidémie et, au besoin, établir les règles les plus équitables possible. D'autre part, on devra évaluer l'impact de l'annulation ou du report de certains travaux et proposer des solutions de rechange, s'il y a lieu. Cette étape, qui varie selon le contexte, n'est pas développée dans le présent guide. Elle n'en demeure pas moins essentielle.

2.1 Évaluation de la vulnérabilité de la forêt

L'évaluation de la vulnérabilité des peuplements est essentielle pour anticiper les effets de l'épidémie sur la dynamique des peuplements et la mortalité probable. Cette évaluation permettra de distinguer, parmi tous les territoires touchés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette, ceux qui courent le plus de risques de connaître une mortalité importante et, en conséquence, de subir des baisses de matière ligneuse susceptibles de diminuer les volumes de bois à récolter et leur valeur.

La méthode d'évaluation de la vulnérabilité proposée concerne les situations les plus couramment observées dans le passé. Elle se veut simple d'application sans prétendre s'adapter à toutes les nuances qu'il est possible de rencontrer sur le terrain. À ce sujet, dans l'évaluation de la vulnérabilité, les épinettes ne sont pas considérées comme étant très vulnérables, puisque la mortalité observée dans le passé ne constitue généralement pas un enjeu économique d'importance. Par contre, en raison de leur importance pour la forêt privée, on aborde le cas des plantations d'épinette blanche dans l'encadré situé à la fin de la section 2.1.1.1. Par ailleurs, la classification proposée n'a pas pour objectif de prendre en compte les réductions de croissance associées à l'épidémie. Il se peut toutefois que les effets de la présente épidémie diffèrent des précédentes et que la vulnérabilité réelle soit différente de celle qui est anticipée pour certains territoires. C'est pourquoi il est nécessaire de suivre la situation de près à l'aide des autres outils disponibles (ex. : suivi de l'insecte et de l'état de santé des peuplements, voir la section 2.2) afin de repérer les cas qui diffèrent et d'ajuster l'indice de vulnérabilité et les actions à prendre en conséquence.

À l'échelle du peuplement, trois variables ont été retenues pour évaluer la vulnérabilité, soit 1) l'importance du sapin dans la composition forestière; 2) le stade de développement et 3) la qualité du site pour le sapin baumier. Même si l'on sait que la densité influence aussi la vulnérabilité, puisque les peuplements les plus denses sont susceptibles de contenir beaucoup d'arbres ayant une faible proportion de houppier même dans les étages supérieurs, cette variable n'a pas été retenue dans la présente méthode afin d'éviter de multiplier les classes. De plus, la distinction du niveau de vulnérabilité est plutôt arbitraire entre des peuplements de densité B et C¹. Cela n'exclut toutefois pas la pertinence de faire ressortir, pour une classe de vulnérabilité donnée, les peuplements de densité A lorsque leur superficie est importante dans le territoire analysé.

À l'échelle d'un territoire, la probabilité d'avoir une séquence prolongée de défoliation grave est fortement influencée par le climat. L'influence climatique peut être indirectement intégrée au moyen du cadre écologique de référence, qui tient compte à la fois des facteurs écologiques permanents (climat et milieu physique) et des perturbations (voir la section 1.1). Par ailleurs, le

1, Pour la définition des classes de densité, se référer à la *Norme de stratification écoforestière – Quatrième inventaire écoforestier du Québec méridional* (Ministère des Ressources naturelles, 2013b).

climat ne se fait pas sentir uniquement en fonction de la longitude et de la latitude. L'altitude influence aussi les conditions climatiques qui, à leur tour, conditionnent la durée des épidémies. C'est dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'Est que l'effet de l'altitude s'est fait le plus sentir dans le passé.

2.1.1 Méthode de classification

2.1.1.1 À l'échelle du peuplement

À l'échelle du peuplement, cinq classes de vulnérabilité, déterminées en fonction de l'effet attendu sur les divers types de peuplement lors d'une épidémie typique dont la durée est d'environ dix ans, sont proposées (tableau 3). Chacune des classes est définie de manière à orienter la décision du sylviculteur pour amoindrir les effets négatifs de l'épidémie tout en profitant au mieux de ses effets positifs.

Tableau 3 Description des classes de vulnérabilité proposées

Classe de vulnérabilité	Description
1. Très élevée	Peuplements qui ont une forte probabilité d'être réinitialisés par l'épidémie : dans la classification de l'inventaire forestier, ce sont ceux dont la surface terrière après l'épidémie pourrait baisser de plus de 75 % (code de perturbation d'origine ES).
2. Élevée	Peuplements qui ne seront pas totalement réinitialisés par l'épidémie, mais dont la surface terrière initiale pourrait chuter de 50 à 75 %. Ce sont les peuplements qui pourraient avoir le code de perturbation moyenne EL au terme de l'épidémie avec le code de densité D.
3. Moyenne	Peuplements dont la surface terrière pourrait chuter de 25 à 50 % au terme de l'épidémie (code de perturbation moyenne EL et de densité B ou C).
4. Faible	Peuplements qui contiennent au moins 25 % de sapin, mais pour lesquels on ne s'attend pas à une baisse de plus de 25 % de la surface terrière à l'issue de la présente épidémie, principalement en raison de leur jeune âge (pas de code de perturbation moyenne). Toutefois, ils pourraient faire partie de l'une ou l'autre des classes précédentes lors de la prochaine épidémie.
5. Très faible ou nulle	Peuplements qui contiennent moins de 25 % de sapin, donc qui ne présentent pas de risque à court et à moyen terme.

On pourra attribuer à chaque peuplement une vulnérabilité probable à l'aide de l'une ou l'autre de ces cinq classes à partir de variables explicatives tels sa composition, son stade de développement et la qualité du site pour le sapin baumier. Par ailleurs, comme il est nécessaire de localiser géographiquement les peuplements selon les différentes classes de vulnérabilité, seuls des descripteurs cartographiques ont été retenus dans l'élaboration de la classification. Les variables explicatives retenues sont la composition forestière, le stade de développement et la qualité du site.

Composition forestière

La composition forestière pourra être définie en utilisant le couvert ainsi que le groupement et le sous-groupement d'essences selon les regroupements synthèses proposés dans le tableau 4. L'objectif est de classer les peuplements selon l'importance qu'y occupe le sapin, l'espèce la plus vulnérable.

Tableau 4 Type de couvert et groupement et sous-groupement synthèse d'essences proposés pour la classification de la vulnérabilité

Type de couvert	Groupement et sous-groupement synthèse d'essences
Résineux	Sapinière (SS) Sapinière avec autres résineux (SR) Autres résineux avec sapin (RS) Autres résineux (RA)
Mélangé	Sapinière avec feuillus (SF) Feuillus avec sapin (FS) Autres mélangés (MA)

Stade de développement

La vulnérabilité d'un peuplement varie en fonction de son stade de développement. Toutefois, les peuplements n'atteignent pas les divers stades au même âge, principalement en raison du climat qui limite la vitesse de croissance. Nous proposons donc d'utiliser le cadre de classification écologique pour établir la relation entre les classes d'âge et le stade de développement. Les domaines et les sous-domaines bioclimatiques sont utilisés à cette fin (tableau 5). La relation proposée vise à caractériser le stade de développement pour les groupements d'essences avec sapin et repose sur la prémisse que le sapin atteint la maturité plus rapidement lorsque le climat est plus chaud.

Tableau 5 Relation entre la classe d'âge et le stade de développement des peuplements par domaine ou sous-domaine pour les groupements d'essences avec sapin^a

Domaine ou sous-domaine	Stade de développement selon la classe d'âge (années)			
	Jeune (j)	Prématurité (pm)	Mature (m)	Vieux (s)
1, 2 et 3	30	30	50	70 ou plus
4 et 5	30	50	70	90 ou plus
6 Ouest	30-50	70	90	120 ou plus
6 Est	30-50-70	90	120 ou plus	120 ou plus

a. Ce tableau (adapté de Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2009) est présenté à titre indicatif et pourra être modifié à la lumière d'informations plus pertinentes, le cas échéant.

Qualité de site

Deux classes de qualité de site sont proposées pour déterminer la vulnérabilité relative des peuplements à la tordeuse des bourgeons de l'épinette à partir des caractéristiques physiques du milieu (tableau 6). Ces classes reflètent le régime hydrique des sites, selon qu'il convient ou non au sapin, sachant que c'est une essence qui tolère mal le stress hydrique aux stades de gaulis et de futaie (Ministère des Ressources naturelles, 2013c).

Tableau 6 Qualité de site pour le sapin, évaluée à partir du régime hydrique découlant des caractéristiques physiques du milieu

Qualité de site pour le sapin	Premier caractère du code du milieu physique ^a	Régime hydrique
Bonne	2, 3, 4, 5, 6	Sol frais et sol humide
Mauvaise	0, 1, 7, 8, 9	Sol très sec, sol sec et sol très humide

a. Pour la description des codes, se référer au tableau 26 du document *Norme de stratification écoforestière – Quatrième inventaire écoforestier du Québec méridional* (Ministère des Ressources naturelles, 2013b).

Intégration des variables

À partir de la combinaison des variables Composition, Stade de développement et Qualité de site, une évaluation de la vulnérabilité des peuplements peut être faite selon les cinq classes décrites au tableau 3. Le tableau 7 permet d'en visualiser le résultat.

Tableau 7 Classe de vulnérabilité selon le groupement et le sous-groupement synthèse d'essences, le stade de développement et la qualité du site pour le sapin baumier

Groupement et sous-groupement synthèse d'essences	Stade de développement	Classe de vulnérabilité	
		Bon site	Mauvais site
Sapinière pure (SS)	Vieux	1	1
	Mature	1	1
	Prémature	2	1
	Jeune	3	2
Sapinière avec autres résineux (SR)	Vieux	2	2
	Mature	2	2
	Prémature	3	2
	Jeune	4	3
Sapinière avec feuillus (SF)	Vieux	2	2
	Mature	2	2
	Prémature	3	2
	Jeune	4	3
Résineux avec sapin (RS)	Vieux	3	3
	Mature	3	3
	Prémature	4	3
	Jeune	4	4
Feuillus avec sapin (FS)	Vieux	3	3
	Mature	3	3
	Prémature	4	3
	Jeune	4	4
Résineux autres que le sapin (RA)	Vieux et mature	5	5
Mélangés autres que le sapin (MA)	Vieux et mature	5	5

a. Classes de vulnérabilité : 1 = très élevée; 2 = élevée; 3 = moyenne; 4 = faible; 5 = très faible ou nulle.

Même si, dans cette classification, la vulnérabilité ne varie pas entre les stades de développement mature et vieux pour un même groupe d'essences, la différenciation de ces stades a été conservée, car elle peut s'avérer intéressante, par exemple si l'on souhaite protéger de vieilles forêts, notamment celles dont la vulnérabilité n'est pas très élevée, pour en préserver la biodiversité.

Dans le cas des peuplements résineux et mélangés sans sapin, il est proposé de considérer uniquement ceux qui sont matures ou vieux afin de pouvoir en apprécier l'importance. Ces peuplements pourraient être récoltés à court terme, mais il serait préférable de les conserver puisqu'ils sont susceptibles de survivre à l'épidémie et qu'ils pourront être récoltés ultérieurement.

En ce qui concerne la qualité de la station, celle-ci n'a pas pour effet de modifier la vulnérabilité des peuplements matures et vieux. Ce sont pour les peuplements prématures, dont l'essence principale ou seconde est le sapin, et pour les peuplements jeunes, ayant le sapin comme essence principale, qui se trouvent sur des sites de mauvaise qualité, que l'on propose d'ajuster la vulnérabilité à la hausse. Par exemple, la classe de vulnérabilité d'une sapinière pure (SS) prémature passe d'élevée (classe 2), sur un bon site, à très élevée (classe 1) sur un mauvais site. L'analyse de la vulnérabilité des peuplements prématures peut permettre de faire un diagnostic sur la vulnérabilité globale d'un territoire et de prévoir les risques à moyen et à long terme lors d'une prochaine épidémie.

La classification proposée vise à établir, à partir des données écoforestières, la vulnérabilité des peuplements susceptibles de subir une défoliation causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette. **Elle ne couvre donc pas les peuplements feuillus ni ceux en régénération ou en voie de régénération dont on ne connaît pas le couvert ou la composition en essences, car ceux-ci risquent peu d'être affectés par l'épidémie actuelle. Certaines interventions sylvicoles peuvent toutefois augmenter la vulnérabilité des peuplements en régénération (voir le chapitre 3).** Dans le cas des peuplements qui auraient fait l'objet d'une intervention partielle tel un dégagement ou une éclaircie précommerciale, il est possible de mener des analyses plus fines à l'échelle régionale en utilisant l'année de l'intervention de pair avec l'année d'apparition de défoliation grave, en y ajoutant des informations relatives à la composition et au site afin d'évaluer le risque de mortalité à court terme.

Finalement, la classification ne couvre pas les plantations. À l'instar des peuplements feuillus, il est possible de se servir des informations sur les essences reboisées ou envahissantes et celles concernant le site pour en assurer le suivi et juger des risques potentiels, le cas échéant.

Vulnérabilité des plantations d'épinette blanche

Lors des dernières épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, la vulnérabilité des plantations d'épinette blanche n'a pas été très documentée. Dans la littérature, pour expliquer l'échec partiel ou total des plantations d'épinette blanche, on évoque la végétation compétitrice, la mauvaise qualité des stations ou encore la qualité du travail de reboisement. D'autre part, dans les études concernant le rendement des plantations d'épinette blanche, on ne fait pas mention de pertes attribuables aux épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Rappelons que ces études comprennent des plantations de différentes classes d'âge, mais que leur sélection a toutefois pu exclure des plantations qui auraient pu être affectées par la tordeuse.

En Mauricie au milieu des années 1960, des plantations d'une quarantaine d'années ont été le foyer d'une épidémie naissante, mais quoiqu'elles aient subi une défoliation grave pendant quelques années, elles ont survécu. D'ailleurs, beaucoup de plantations qui ont été faites pendant la dernière épidémie sont aujourd'hui parvenues à l'âge d'une première ou d'une seconde éclaircie commerciale. En définitive, peu de situations ont été rapportées concernant l'impact qu'aurait eu une épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette sur la survie des plantations d'épinette blanche.

En ce qui concerne l'épidémie actuelle, les premiers foyers de défoliation importante ont été signalés à quelques reprises dans des plantations plus ou moins âgées. Dans un cas en particulier, on a même constaté une dégradation rapide de l'état des arbres et des taux de mortalité assez importants pour obliger les gestionnaires à récolter les plantations. Ces plantations avaient été faites dans les années 1930 et 1940 sur des terres appauvries par l'agriculture. Dès la première année de défoliation grave, on a remarqué que les arbres avaient un houppier clairsemé, ce qui a été expliqué par la présence de caries de racines. Les arbres affectés ajustent leur masse foliaire à leur masse racinaire. Ce phénomène rend alors les épinettes blanches aussi vulnérables que le sapin. Cette situation est loin d'être généralisée, mais mérite quand même qu'on y porte attention, particulièrement pour les plantations faites sur des friches. Toute autre situation qui pourrait favoriser la prolifération des caries de racines doit être considérée, notamment les plantations trop denses ou établies sur des sites inadéquats.

En somme, on considère généralement que les plantations immatures d'épinette blanche sont peu ou ne sont pas vulnérables à la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Il faut toutefois demeurer vigilant et suivre la situation de près lorsqu'il y a des facteurs de risque.

2.1.1.2 À l'échelle d'un territoire

L'évaluation de la vulnérabilité à l'échelle d'un territoire doit tenir compte de la durée probable d'une période prolongée de défoliation grave. En ce qui concerne la forêt privée, l'histoire récente laisse entrevoir des épidémies de courte durée dans le domaine de l'érablière à caryer cordiforme, le domaine de l'érablière à tilleul et dans le domaine de la pessière noire à mousses. Il est donc possible que la classification de la vulnérabilité proposée surévalue l'effet de l'épidémie. Toutefois, il y a très peu de forêts privées dans le domaine de la pessière à mousses. Par ailleurs, les épidémies sont généralement de plus courte durée à des altitudes plus élevées, ce qui influence aussi la vulnérabilité des peuplements. Puisque les zones de plus haute altitude de la forêt privée se trouvent principalement dans les domaines de la sapinière à bouleau blanc, il est proposé d'ajuster à la baisse les classes de vulnérabilité en fonction d'un gradient altitudinal qui leur est propre.

Le tableau 8 présente les seuils d'altitude proposés pour adapter « localement » la classification de la vulnérabilité présentée au tableau 7. Ces seuils serviront à définir un territoire pour lequel la classification peut être appliquée telle qu'elle est proposée, un territoire pour lequel les classes de vulnérabilité pourraient être revues à la baisse d'une classe et un territoire pour lequel la classification ne s'applique pas, compte tenu du faible risque de défoliation cumulative. Les seuils proposés sont fondés en partie sur la littérature (Blais, 1964, 1965 et 1985; Saucier et autres, 2009) et en partie sur les données historiques relatives aux épidémies passées (nombre d'années de défoliation et perturbation totale ou partielle notée lors des inventaires forestiers). Dans le cas du domaine de la pessière à mousses, ils tiennent compte aussi de la sous-évaluation vraisemblable de la gravité des épidémies passées et du fait, maintenant généralement reconnu, que l'aire optimale de la tordeuse des bourgeons de l'épinette couvre déjà des territoires plus nordiques et continuera probablement son extension vers le nord.

Puisque ces seuils s'appliquent sur une proportion relativement restreinte du territoire à l'échelle de la province et que leurs valeurs devront peut-être être revues en fonction du déroulement de l'épidémie, on propose de conserver la classe originale de vulnérabilité et d'ajouter une « classe de vulnérabilité révisée » selon l'altitude, de manière à pouvoir comparer les résultats et évaluer leur pertinence selon le déroulement de l'épidémie. Les seuils pourront être modifiés selon une connaissance plus fine du territoire analysé.

Tableau 8 Seuils d'altitude proposés pour adapter la classification de la vulnérabilité dans les domaines de la sapinière à bouleau blanc et de la pessière à mousses

Domaine bioclimatique	Modification de la classification de la vulnérabilité selon les seuils d'altitude		
	Comme proposé	Réduction d'une classe	Inapplicable
Sapinière à bouleau blanc	Moins de 600 m	Entre 600 et 750 m	750 m et plus
Pessière à mousses	Moins de 400 m	Entre 400 et 500 m	500 m et plus

2.1.1.3 Analyse et diagnostic

L'analyse de la vulnérabilité doit d'abord être faite à l'échelle du peuplement, puis à l'échelle du boisé. À cette échelle, les données forestières plus détaillées contenues dans les plans d'aménagement forestier pourront être mises à profit. Des analyses à l'échelle du territoire de gestion sont aussi souhaitables pour permettre d'établir des orientations d'aménagement, notamment lorsqu'il est question de répartir les budgets.

L'évaluation de la vulnérabilité doit faire ressortir l'importance et les caractéristiques des peuplements les plus vulnérables, notamment ceux des classes 1, 2 et 3. Une cartographie générale de la vulnérabilité à l'échelle d'un grand territoire s'avère aussi utile pour avoir une vue d'ensemble, mais il est certainement intéressant de produire des cartes plus détaillées pour les classes les plus vulnérables. Il est aussi souhaitable, lors de la production des profils de vulnérabilité, d'ajouter des éléments qui ne sont pas inclus dans la classification, mais qui pourraient influencer l'aménagement. C'est le cas notamment de la densité des peuplements et du volume à l'hectare de sapin baumier. La possibilité de visualiser en tout temps l'information sur la qualité du site pour le sapin peut s'avérer utile dans le choix des interventions.

Au moment où l'épidémie a déjà touché ou est sur le point de toucher certaines régions, une analyse de vulnérabilité devrait y être conduite. Cette analyse va de pair avec les suivis de défoliation, afin de détecter les risques de mortalité et de pertes de volume à court terme. On peut ensuite établir les priorités et l'urgence des récoltes, que ce soit sous la forme d'une récolte préventive ou d'une récolte d'arbres associée à une perturbation naturelle (récupération). **Il faut toutefois garder en tête que l'analyse de vulnérabilité permet d'anticiper uniquement les risques de mortalité du sapin baumier.** La précision des résultats peut varier selon les données utilisées pour faire la classification.

En période d'endémie, on devrait toujours tenir compte de l'analyse de vulnérabilité des peuplements face à la tordeuse des bourgeons de l'épinette afin de réduire progressivement, par des choix d'aménagement, la vulnérabilité du territoire et les risques auxquels les peuplements sont exposés lorsque l'épidémie survient.

2.2 Suivi de l'épidémie

Les prochaines sections font un tour d'horizon des différentes méthodes utilisées par le MFFP pour détecter la tordeuse des bourgeons de l'épinette et suivre le déroulement de l'épidémie. Pour plus d'informations, on peut consulter la fiche descriptive sur la tordeuse des bourgeons de l'épinette disponible sur le Web à l'adresse suivante :

mffp.gouv.qc.ca/forets/fimaq/insectes/fimaq-insectes-insectes.jsp, ou communiquer avec le Ministère¹.

2.2.1 Suivi de l'insecte

Le MFFP procède depuis 1938 au dépistage et au suivi des populations des principaux insectes forestiers connus pour causer des dommages importants aux forêts. Dans le cas de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, un réseau de stations permanentes d'observation a été mis en place dans les années 1980 et sert à mesurer les fluctuations des populations et des dommages dans l'espace et dans le temps. En période d'endémie, lorsque les populations sont très basses, elles sont évaluées à partir de la capture des papillons dans des pièges à phéromones. Le suivi des populations au cours de cette période permet de mesurer leur tendance au moment où il est difficile de repérer l'insecte et encore plus difficile de percevoir la défoliation. Lorsque la capture des papillons dépasse le seuil à partir duquel on peut dénombrer les insectes directement dans les arbres, on procède alors



Piège à phéromones utilisé pour capturer des papillons

1. Direction de la protection des forêts, Service de la gestion des ravageurs forestiers, 2700, rue Einstein, local D2.370A, Québec (Québec) G1P 3W8, téléphone : 418 643-9679, télécopieur : 418 643-0381, dpf@mrn.gouv.qc.ca

à une évaluation des populations en faisant le décompte des larves en hibernation sur les branches (voir la section 2.2.2). Cette mesure est complétée par des évaluations de défoliation des pousses annuelles à la fois sur le terrain, à l'aide de jumelles, et en laboratoire, sur les branches récoltées pour le dénombrement des larves. Lorsque les populations atteignent un seuil à partir duquel on peut anticiper la défoliation facilement observable, on ajoute au réseau de stations permanentes des stations temporaires pour avoir une idée plus précise de la situation régionale des populations. Les données recueillies permettront de planifier un relevé aérien qui servira à évaluer l'étendue et la gravité de la défoliation l'année suivante dans les territoires où on est susceptible d'en observer. **Dans le cycle de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, ce stade correspond à celui d'une épidémie imminente (période d'endémie, phase de préépidémie)** (voir l'encadré ci-après). C'est à ce moment du cycle qu'il convient de réviser la programmation de certains traitements sylvicoles connus pour augmenter temporairement la vulnérabilité de peuplements autrement considérés comme peu ou pas vulnérables (voir chapitre 3). Étant donné que le dépistage et le suivi des populations de l'insecte se font surtout par échantillonnage dans un réseau de stations facilement accessibles par voie terrestre, on a aussi recours à l'imagerie satellitaire pour détecter les zones où la défoliation a pu survenir sans qu'on l'ait prévue.

Déterminer les zones où l'épidémie est imminente pour gérer les risques associés à certains traitements sylvicoles

Bien qu'on étudie la tordeuse des bourgeons de l'épinette depuis longtemps, il est encore difficile de prévoir le développement des épidémies. L'analyse des tendances des populations sur plusieurs années, les inventaires automnaux de prévision et l'évolution des dommages annuels dans l'espace et dans le temps peuvent servir d'indicateurs pour déterminer les zones où l'épidémie serait imminente (période d'endémie, phase préépidémique). Ces zones revêtent une importance particulière, car il faut savoir où il est possible de procéder à certains traitements sylvicoles et où il faut les modifier ou les cesser lorsqu'ils mettent le rendement des peuplements en péril.

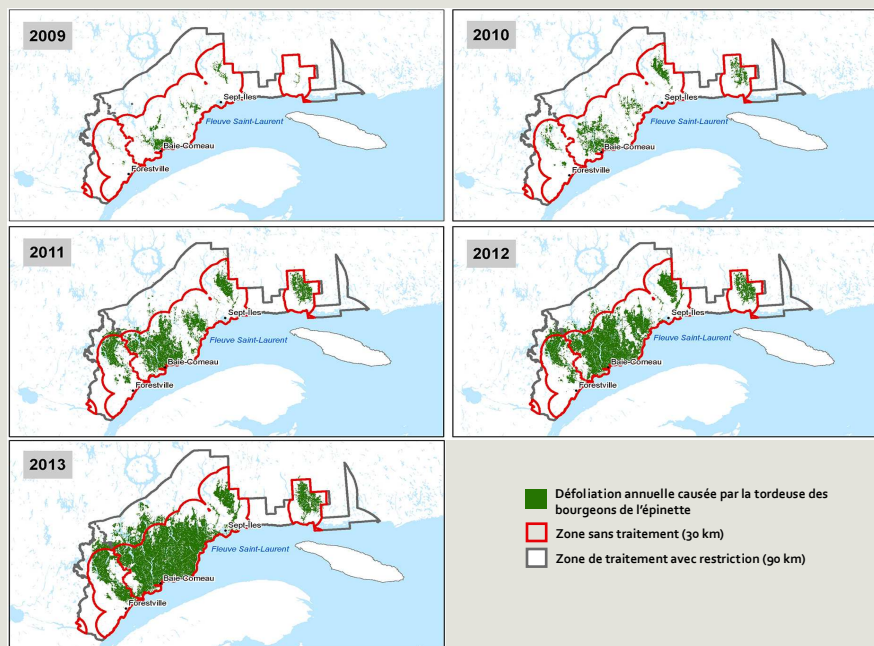
Malheureusement, le comportement imprévisible des populations de tordeuses ne permet pas de délimiter ces zones avec exactitude. Théoriquement, une épidémie peut être considérée comme imminente dans un territoire dès qu'on observe une tendance à la hausse des populations de tordeuses et avant même que la défoliation soit détectable. De plus, on doit prendre en compte la capacité des insectes à parcourir de grandes distances lorsqu'ils sont au stade adulte (papillon). Les déplacements sont conditionnés par plusieurs facteurs difficiles à prévoir et peuvent se faire sur des dizaines, voire des centaines de kilomètres, ce qui complique la délimitation des zones à risque. Comme il n'y a pas de méthode précise pour déterminer à l'avance l'imminence de l'épidémie et que le contexte forestier peut varier d'une région à l'autre, il vaut mieux obtenir l'avis des spécialistes du MFFP pour circonscrire à l'échelle d'un territoire, par exemple celui d'une Agence de mise en valeur des forêts privées, la partie où l'épidémie peut être considérée comme imminente et réviser le zonage annuellement. Par ailleurs, lorsqu'on conseille des propriétaires de boisés, il faut bien les informer et être en mesure d'évaluer leur seuil de tolérance aux risques associés aux interventions proposées.

La situation vécue récemment sur la Côte-Nord illustre la difficulté d'effectuer une telle délimitation pour moduler les travaux sylvicoles. En 2010, une zone d'interdiction des travaux d'éducation a été établie à 30 km des superficies défoliées, basée sur la progression observée des dommages entre 2006 et 2009. Une zone de restriction a également été définie à l'aide d'une bande de 60 km de largeur au pourtour de la zone d'interdiction. Trois ans plus tard, en 2013, on constatait que l'épidémie avait débordé de la zone d'interdiction dans plusieurs secteurs. La zone à risque élevé délimitée en 2010 a donc été une bonne approximation de l'étendue des dommages pour les deux années suivantes. Ces zones de risque doivent toutefois être revues annuellement pour correspondre au rythme de développement de l'épidémie.

Déterminer les zones où l'épidémie est imminente... (suite)

Malgré le respect du zonage, plusieurs peuplements au stade de gaulis, situés à l'extérieur de la zone d'interdiction et ayant été traités en 2010 par une éclaircie précommerciale, ont été gravement défoliés au point de menacer leur survie.

Des peuplements semblables, situés à proximité et qui n'ont pas été traités, ont été significativement moins défoliés (voir la photo ci-dessous).



Cet exemple doit inciter les forestiers à adopter une attitude prudente lorsque vient le temps d'établir une limite entre des zones où la programmation des travaux sylvicoles peut être poursuivie et celles où il est indiqué de modifier certains traitements.

Portion de peuplement non traitée (défoliation totale de 40 à 50 %)

Éclaircie précommerciale (défoliation totale ≥ 90 %)



Défoliation totale cinq ans après une éclaircie précommerciale : différence entre une portion de peuplement traitée pendant la phase de préépidémie et une portion non traitée

2.2.2 Évaluation du niveau de population des larves en hibernation

La mesure des populations de la tordeuse des bourgeons de l'épinette lorsqu'elle est en hibernation, alors que les chenilles sont au deuxième âge larvaire (L2), permet d'évaluer l'importance des populations de la prochaine génération et ainsi d'évaluer l'importance de la défoliation attendue des pousses annuelles. Lorsque cette évaluation est faite à la fin de l'été ou à l'automne, elle permet d'avoir un aperçu des zones où l'on peut s'attendre à trouver des populations en assez grand nombre pour causer des dommages détectables, ainsi qu'un aperçu du niveau de défoliation probable. Une mesure des populations à partir de stades larvaires plus avancés (L4 et L5) peut être prise au printemps pour estimer la mortalité hivernale. L'échelle d'évaluation permet de distinguer trois niveaux de population en fonction du nombre de larves par branche. À partir de ces niveaux de population, on peut déduire un niveau probable de défoliation des pousses annuelles (tableau 9).

Tableau 9 Niveau de population et défoliation des pousses annuelles prévue à partir du dénombrement des larves en hibernation

Nombre de larves en hibernation (L2) par branche de sapin de 75 cm	Niveau de population	Défoliation des pousses annuelles prévue
De 1 à 4	Faible	Légère
De 5 à 9	Moyen	Modérée
10 et plus	Élevé	Grave

2.2.3 Évaluation de la défoliation des pousses annuelles

L'évaluation de la défoliation des pousses annuelles peut être faite à l'échelle d'une pousse, d'une branche, d'une partie ou de l'ensemble du houppier d'un arbre, d'un ensemble d'arbres et d'un territoire. La production de cartes de défoliation des pousses annuelles par la tordeuse des bourgeons de l'épinette fait partie de la trousse de suivi des principaux insectes et des principales maladies affectant les forêts du Québec. Elle vise à donner une idée générale de l'étendue et la gravité des dommages annuels et de leur évolution dans l'espace et le temps. L'accumulation de ces informations au fil des années est fort utile pour apprécier les changements qui se produisent d'une épidémie à l'autre, notamment en raison des changements climatiques et des activités humaines.

Pour avoir une bonne idée de la distribution et de la gravité de la défoliation sur de grands territoires, on a recours à des relevés aériens. Les résultats sont présentés sous forme cartographique et statistique. Ils permettent d'obtenir un état général de la défoliation des pousses annuelles causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette selon les trois classes suivantes : défoliation légère, modérée ou grave. La précision des résultats est influencée par différents facteurs, dont les paramètres de vol et les conditions climatiques. De plus, il faut garder en tête que les zones endommagées sont délimitées sans tenir compte de la nature des peuplements et que l'observateur doit circonscrire et évaluer la gravité de la défoliation pour quelques 1 000 ha à la minute. Ainsi, des superficies comprenant des forêts de toute nature et

même des superficies non forestières peuvent être incluses dans les polygones numérisés. Ces superficies sont par le fait même incluses dans les statistiques qui seront présentées. Il importe donc de joindre ces informations à celles déjà disponibles pour le territoire. L'information forestière est certes la première qu'il convient de jumeler avec les données provenant des relevés aériens, ce qui permet de mieux apprécier la gravité de l'épidémie. Cette caractérisation forestière des zones touchées par la défoliation peut être faite selon le niveau de précision souhaité. La classification de la vulnérabilité proposée (voir la section 2.2.1) est toute désignée pour faire une première analyse des enjeux. Par ailleurs, en superposant l'information des relevés aériens aux travaux d'aménagement prévus, on sera dès lors en mesure d'évaluer la pertinence de les réaliser.

Méthodologie pour la production des cartes de défoliation des pousses annuelles

Les cartes de défoliation des pousses annuelles sont produites à partir d'observations réalisées à bord d'aéronefs. Les avions utilisés pour les survols doivent offrir une bonne visibilité, une bonne stabilité à basse altitude et à faible vitesse et avoir une autonomie de vol appréciable. Les territoires couverts par les survols sont choisis sur la base des inventaires de prévision de la défoliation effectués chaque année à l'automne de même qu'en fonction des territoires où des dommages ont déjà été observés, et ce, indépendamment de leur tenure.

Le survol s'effectue à une altitude d'environ 240 m, à une vitesse moyenne de 160 km/h. Le territoire à survoler est patrouillé en suivant des lignes orientées selon un axe nord-sud et équidistantes d'environ 4,5 km. L'observateur utilise une tablette numérique qui lui donne sa position en temps réel sur les lignes de vol. La carte sur laquelle les données sont inscrites comporte des informations sur la topographie, l'hydrographie, le réseau routier et d'autres infrastructures telles que les voies ferrées et les lignes de transport d'énergie. On peut aussi y trouver de l'information sur la forêt (peuplements forestiers susceptibles, feux récents, coupes récentes, etc.). Le survol se fait lorsque les dommages annuels sont le plus apparents, soit de la fin juin à la fin juillet; la défoliation annuelle est alors complétée, mais les aiguilles partiellement ou totalement coupées de l'axe des pousses y sont encore rattachées par la soie produite par les larves et ont pris une couleur rougeâtre facilement détectable à distance. Au fur et à mesure qu'il survole une ligne, l'observateur délimite à main levée des zones de défoliation à l'aide des divers repères disponibles sur la carte et il inscrit pour chacune de ces zones une cote de défoliation. D'une ligne à l'autre, l'observateur s'assure de la concordance des limites des zones et des classes de défoliation. Trois classes de défoliation des pousses annuelles sont utilisées : légère, modérée et grave. Ces classes sont définies selon deux critères : la proportion d'arbres susceptibles (sapin et épinettes) qui montrent des signes de défoliation facilement observables (couleur rougeâtre) et l'endroit du houppier où se situe la défoliation des arbres touchés. La description des classes utilisées lors du survol pour cartographier la défoliation des pousses annuelles est présentée dans le tableau qui suit.

Classe utilisée pour la cartographie de la défoliation des pousses annuelles	Proportion d'arbres susceptibles avec défoliation facilement observable (couleur rougeâtre)	Position de la défoliation dans le houppier des arbres touchés	Défoliation moyenne des pousses annuelles généralement mesurée au sol
Légère	Quelques arbres	Tiers supérieur	Moins de 35 %
Modérée	Majorité des arbres	Moitié supérieure	Entre 35 et 70 %
Grave	Majorité des arbres	Totalité du houppier	Plus de 70 %

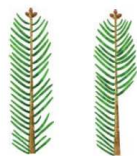
Méthodologie pour... (suite)

Plusieurs facteurs influencent la précision des résultats de la cartographie. Les caractéristiques du survol font que l'observateur doit se prononcer sur plus de 1 000 ha à la minute, ce qui équivaut à plus de 25 lots de 40 ha. L'expérience de l'observateur, le synchronisme avec la période de plus grande visibilité des dommages et les différents phénomènes qui peuvent rendre l'évaluation de ces dommages problématique à distance sont autant de facteurs à considérer. Parmi les phénomènes qui compliquent la tâche de l'observateur, on compte les conditions météorologiques qui peuvent diminuer la visibilité ainsi que d'autres phénomènes comme la destruction des bourgeons par les larves avant leur débourrement qui laisse des traces difficiles à percevoir à distance.



Observateur qui délimite des contours de défoliation à bord d'un aéronef

La figure ci-contre illustre les classes de défoliation présentées dans le tableau précédent à l'échelle d'une pousse annuelle. Ces classes peuvent être transposées à l'échelle d'une branche, d'une partie ou de l'ensemble du houppier d'un arbre susceptible. Le lecteur est aussi invité à consulter l'annexe C, qui présente les défoliations cumulatives à l'échelle de la branche et de l'arbre. Une bonne connaissance du boisé et de son état constitue la meilleure garantie pour un propriétaire de pouvoir réagir en temps opportun.

Classe de défoliation pour une pousse annuelle de sapin baumier	Impact à court et à long terme sur l'arbre
Nulle à légère (moins de 35 %) 	Aucun impact
Moderée (de 35 à 70 %) 	Ralentissement de la croissance, pas de risque de mortalité
Grave (plus de 70 %) 	Ralentissement marqué de la croissance, tête des arbres grisâtre après trois ou quatre années consécutives. Si la défoliation grave se poursuit au-delà de quatre ans, le feuillage restant peut être insuffisant pour que l'arbre survive.

2.2.4 Historique de la défoliation

Étant donné que les dommages causés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette se situent principalement sur les pousses de l'année courante, que les arbres susceptibles retiennent leurs pousses pendant plusieurs années et qu'ils peuvent survivre avec moins de 10 % de leur masse totale de feuillage, **ils doivent subir une défoliation grave pendant plusieurs années consécutives pour être en danger de mort à court terme.** Ainsi, en superposant les résultats des relevés de la défoliation annuelle (niveau grave seulement), la cumulation des informations relatives à la défoliation des pousses annuelles permet de circonscrire les secteurs où la probabilité de mortalité est la plus élevée.

La cartographie ainsi obtenue servira à établir le périmètre des secteurs ayant un historique de défoliation semblable et à les caractériser en utilisant les différentes sources de données dont on dispose : vulnérabilité, programmation de travaux, travaux sylvicoles potentiellement sensibles, etc. Lorsque les valeurs de l'indice sont de 12 ou moins, on peut considérer qu'on est en période d'épidémie, mais dans la phase sans mortalité significative. Lorsque les valeurs de l'indice de défoliation cumulée dépassent 12, soit l'équivalent de quatre années de défoliation grave des pousses annuelles pour une zone donnée et que celle-ci renferme des peuplements vulnérables qui présentent un enjeu, il y a lieu d'évaluer la défoliation sur l'ensemble de leur houppier. Cette évaluation indique leur état de santé après des défoliations répétées. Elle permet de connaître de façon plus précise la probabilité de survie à court terme (voir la section 2.2.5).

La figure 12 présente un exemple simplifié de cartographie de l'historique de défoliation grave d'un territoire donné situé sur la Côte-Nord, dans la forêt publique, là où l'épidémie sévit depuis 2006.

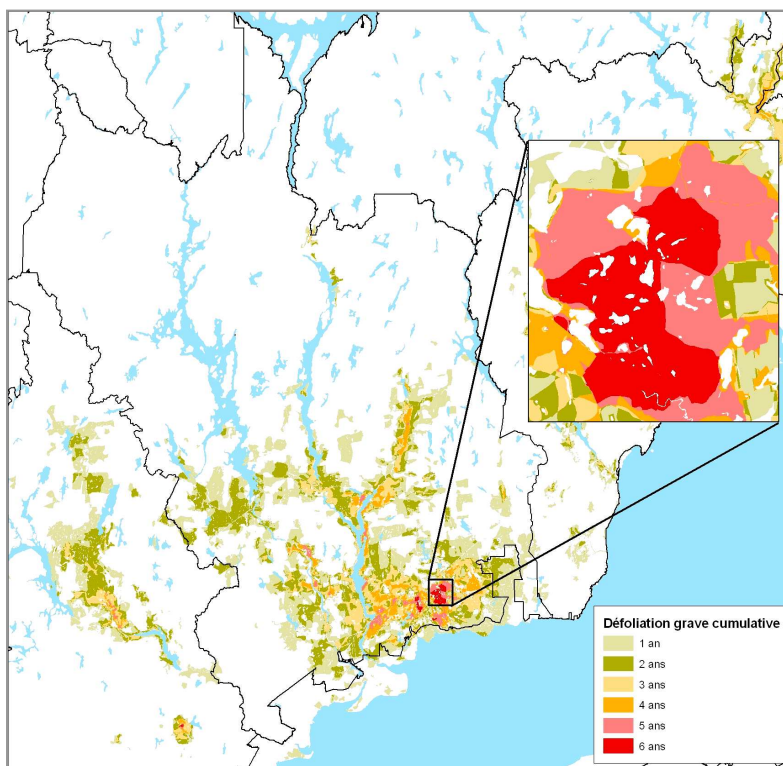


Figure 12 Cartographie de l'historique d'une défoliation causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette

2.2.5 Évaluation de l'état de santé des peuplements touchés par l'épidémie adaptée à la forêt privée

Lorsqu'on évalue l'état des arbres affectés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette, l'objectif est double : **on doit d'abord évaluer la pertinence de procéder à leur récolte et, dans l'affirmative, on doit déterminer le temps dont on dispose pour le faire.** À cette fin, il faut premièrement évaluer la défoliation totale des arbres selon les classes proposées plus loin et, deuxièmement, valider le potentiel d'utilisation des arbres. Voici la démarche proposée pour un boisé.

1. À l'aide de la carte de vulnérabilité des peuplements (produite selon la méthode de classification décrite à la section 2.1.1), déterminer ceux qui contiennent une proportion d'arbres vulnérables suffisante pour justifier la récolte. Il faut aussi considérer la dimension des tiges et les marchés disponibles.
2. Déterminer l'histoire récente de la défoliation à l'aide des relevés aériens de défoliation annuelle.
3. Cerner les zones qui ont subi une défoliation pendant au moins trois à quatre ans. Il est préférable d'inclure tous les niveaux de défoliation à cette étape, compte tenu du faible degré de précision des relevés à cette échelle.
4. Valider, par une inspection rapide sur le terrain, la présence d'une défoliation significative (voir l'annexe C).
5. Si l'on ne voit pas d'arbres qui ont subi une défoliation annuelle grave, attendre pour procéder à l'évaluation de la défoliation totale.
6. Si l'on voit des arbres qui ont subi une défoliation annuelle grave au cours de la dernière année, mais dont la **défoliation totale de la masse foliaire présumée est inférieure à 50 %**, il peut être approprié de procéder à la récolte de certains peuplements sans plus tarder en se référant au chapitre 3 pour établir les traitements les plus appropriés. Il peut s'avérer utile à ce moment-ci de se donner quelques repères pour suivre l'évolution de la défoliation totale (voir l'encadré suivant).

Placettes avec arbres repères pour suivre l'évolution de la défoliation totale et de la dégradation des arbres morts

Cette méthode d'évaluation permet de mesurer le rythme de progression de la défoliation totale d'un certain nombre d'arbres représentatifs des peuplements choisis à l'étape 1 de la démarche et rendus préférablement à l'étape 6 ou à l'étape 7. Elle consiste à marquer et à numérotiser les arbres dont on veut faire le suivi. Les informations à recueillir sont les informations forestières usuelles : strate forestière, numéro de peuplement, coordonnées géographiques, essence, DHP, étage, proportion de houppier. À ces données s'ajoutent des informations propres au contexte de l'épidémie : classe de défoliation totale, tête cassée, estimation de l'année de la mort lorsque c'est le cas, indicateurs de dégradation tels que sciure de bois au pied de l'arbre, écorce détachée du tronc, trous de pics-bois, aubier friable. Le mesurage annuel de ces arbres repères permettra de juger du rythme de progression de la défoliation totale et de la dégradation des arbres. Les arbres repères peuvent être répartis le long de virées ou concentrés dans des parcelles. Dans tous les cas, il est souhaitable de connaître leur environnement forestier, en l'occurrence la surface terrière totale, la surface terrière par essence, de même qu'une appréciation générale du régime hydrique de la station (voir le tableau 6).

7. Dès qu'on voit des arbres ayant subi une défoliation annuelle grave au cours de la dernière année, et dont la **défoliation totale de la masse foliaire présumée est supérieure à 50 %**, il faut faire **une évaluation plus précise** de la défoliation totale des arbres. Cela permet de déterminer la pertinence d'une récolte et le temps dont on dispose pour la faire, notamment lorsqu'elle doit être échelonnée sur plusieurs années en raison de l'importance des volumes concernés ou de la disponibilité des marchés (voir l'encadré suivant).

Placettes pour évaluer avec précision la défoliation totale et la dégradation des arbres morts

Des placettes au prisme peuvent servir à évaluer l'état de la situation à un moment précis de l'épidémie dans les peuplements définis à l'étape 1 et rendus à l'étape 7. Les informations qui doivent être recueillies sont les mêmes que dans le cas des placettes avec arbres repères, mais ici, il n'y a pas de marquage d'arbres. Le nombre de placettes devra être établi en fonction de la nature des peuplements et de la variabilité de l'état des arbres, en utilisant les balises usuelles de l'inventaire forestier.

Le tableau 10 présente les **classes de défoliation totale proposées** ainsi que leur interprétation. La compilation des données selon ces classes **permettra d'avoir une bonne idée du stade de l'épidémie ainsi que de l'urgence de procéder à la récolte**. Quatre classes ont été retenues pour décrire l'état des arbres. Ces classes ont été choisies pour refléter la probabilité de survie des arbres si l'épidémie se termine ou le risque qu'ils meurent à court terme. La première classe concerne les arbres qui ont perdu moins de 50 % de leur masse foliaire. Leur probabilité de survie est élevée si l'épidémie cesse et le risque que ces arbres meurent à court terme (de deux à trois ans) est faible. La deuxième classe concerne les arbres qui sont défoliés dans une proportion de 50 à 89 % : leur probabilité de survie si l'épidémie cesse varie selon leur vigueur et la quantité résiduelle de feuillage, le risque que ces arbres meurent à court terme va de moyen à élevé. La troisième classe concerne les arbres défoliés entre 90 et 99 % et pour lesquels le risque de mort à court terme est très élevé et la probabilité de survie, faible, même si l'épidémie cesse. Finalement, les arbres qui sont défoliés à 100 % sont présumés morts. Dans les faits, ils peuvent être morts depuis un certain temps ou être sur le point de mourir. Seul un examen du cambium peut permettre de statuer sur leur vitalité (voir les photos à la page suivante). Le tableau 2 (à la section 1.7) permet d'estimer le temps écoulé depuis la mort d'un arbre à partir de critères visuels et donne une interprétation sur leur potentiel de transformation.



Arbres défoliés dans une proportion de 90 à 99 %

Tableau 10 Classe de défoliation totale (%), code utilisé lors du relevé et interprétation quant à l'état de santé des arbres et à leur risque de mortalité à court terme

Classe de défoliation totale	Code cartographique	Interprétation	
		État de santé	Risque de mortalité à court terme
Moins de 50 %	1	Forte probabilité de survie si l'épidémie cesse	Faible
De 50 à 89 %	2	Probabilité de survie si l'épidémie cesse selon la vigueur et la quantité résiduelle de feuillage	Moyen
De 90 à 99 %	3	Faible probabilité de survie même si l'épidémie cesse	Élevé
100 %	4	Probabilité quasi nulle de survie même si l'épidémie cesse, notamment pour les arbres de dimension commerciale	Présumé mort



Cambium d'un sapin vivant



Cambium avec stries brunes d'un sapin mourant



Cambium orangé d'un sapin mort



Galeries d'insectes dans le bois

On peut déterminer si un arbre est mort en examinant la couleur de son cambium.

Méthode d'évaluation de l'état de santé des peuplements dans la forêt publique

L'encadré suivant explique la méthode utilisée par le MFFP pour évaluer l'état de santé des peuplements, entre autres sur la Côte-Nord. Cette information est utilisée dans la forêt publique pour rediriger la récolte aux endroits les plus à risque, avant que la mortalité ne soit trop importante. La méthode d'évaluation n'est toutefois pas applicable à l'échelle de la petite forêt privée.



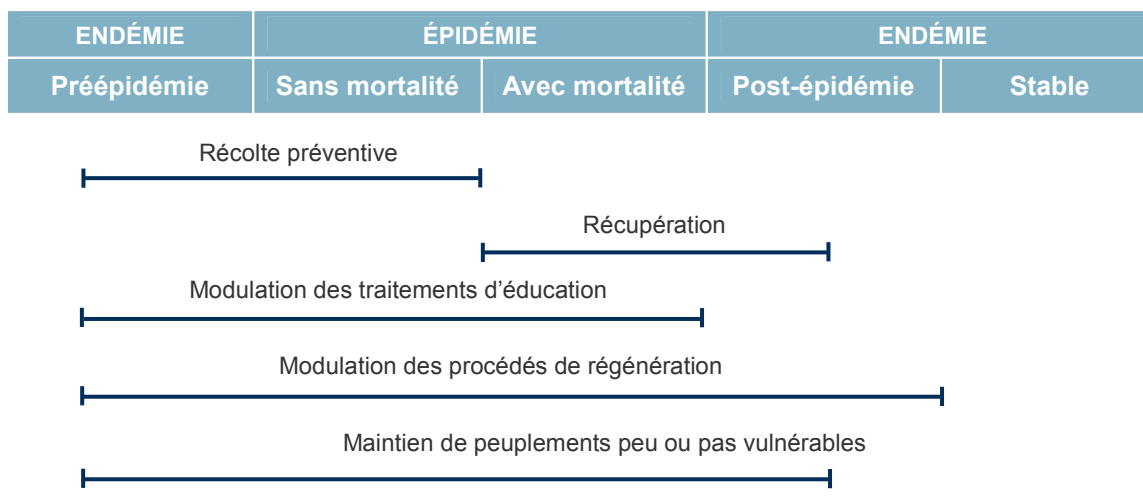
Peuplement gravement touché par la tordeuse des bourgeons de l'épinette sur la Côte-Nord

Évaluation visuelle de l'état de santé des peuplements au moyen de relevés aériens

Les relevés aériens utilisés pour évaluer l'état de santé des peuplements sont effectués par le MFFP. Ils sont faits à bord d'un hélicoptère parce qu'ils exigent de la visibilité et une grande souplesse. L'espacement entre les lignes de vol (1 km ou moins) de même que la vitesse de vol sont réduits pour permettre à l'observateur de bien évaluer la défoliation des arbres. L'évaluation doit être faite lorsque le feuillage, rougi par l'activité de l'insecte, est tombé afin que le feuillage résiduel de l'arbre soit bien visible. L'évaluation est faite pour un polygone prédéterminé dont les limites sont artificielles, soit des limites de 15 secondes par 15 secondes en longitude et en latitude, dont la superficie est d'environ 14 ha (polygones utilisés pour géoréférencer les données forestières du Système d'information forestière par tesselle [SIFORT] [Pelletier, Dumont et Bédard, 2007]). Cette méthode a été adaptée de celle utilisée lors de l'épidémie de 1967 à 1992 qui a été décrite par Chabot et Roy (1979).

2.3 Moyens disponibles pour faire face à l'épidémie

Les sylviculteurs disposent de plusieurs moyens pour atteindre les quatre objectifs de l'approche de gestion face à l'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette proposée par le MFFP (voir l'introduction). Ils devront décider du juste dosage de ces moyens en période d'endémie et tout au long de l'épidémie. Nous présentons ici les principaux moyens disponibles ainsi qu'une explication de leur nature et de leur portée en rapport avec les périodes d'endémie et d'épidémie et selon leurs phases respectives (voir le tableau 1 à la section 1.5). La figure 11 sert de repère pour situer dans le temps le recours aux moyens présentés dans le tableau 11.

Tableau 11 Résumé des moyens disponibles pour faire face à l'épidémie dans la forêt privée

En période d'endémie, dans la phase de préépidémie, la **récolte préventive** fait partie des moyens préconisés par le MFFP pour réduire la vulnérabilité des forêts et des peuplements à la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Elle consiste à prioriser la récolte des peuplements les plus vulnérables au moyen de coupes totales ou partielles. Des indications détaillées sur la modulation de la récolte dans les peuplements matures sont données à la section 3.3.

Au début de l'épidémie, avant d'observer un taux de mortalité significatif (période d'épidémie, phase sans mortalité), la **récolte préventive, dictée à la fois par la vulnérabilité et la défoliation**, permet d'adapter le plan d'aménagement du boisé à l'activité de l'insecte. Elle est faite dans les peuplements les plus vulnérables (plus particulièrement ceux des classes 1 et 2) déjà touchés par l'épidémie avant qu'on observe un taux de mortalité significatif. Il s'agit de récolter principalement des sapins baumiers, qui sont plus ou moins défoliés, mais dont le bois est encore sain. Cette option doit être utilisée prioritairement, en tenant compte des indications fournies à la section 3.3.

La **récolte associée à une perturbation naturelle** (récupération) est aussi valable pour les peuplements les plus vulnérables touchés par un taux de mortalité significatif (au moins 10 % du volume). Elle consiste à récolter principalement, au moyen de coupes totales ou partielles, des sapins baumiers plus ou moins gravement défoliés, mais sains, mourants ou morts depuis généralement moins de trois ans, plus ou moins détériorés (tête tombée au sol, coloration et carie de l'aubier, trous d'insectes xylophages) selon l'usage auquel le bois est destiné. La récupération est la dernière chance qu'on a de minimiser les pertes de volume. On pourrait devoir y recourir d'autant plus qu'on aura moins utilisé les deux options précédentes. Toutefois, il est essentiel de savoir quelles sont les spécifications des acheteurs avant de procéder à la récolte pour s'assurer que les bois trouveront preneur.

Le **maintien de peuplements peu ou pas vulnérables** pouvant survivre à l'épidémie doit être considéré pour répondre aux besoins des propriétaires des boisés ou encore pour remplir des fonctions écologiques, liées notamment au maintien des vieilles forêts¹.

1. Voir le document *L'aménagement écosystémique dans un contexte d'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette – Guide de référence pour moduler les activités d'aménagement dans les forêts publiques* (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2014b).

La **modulation des traitements d'éducation** des peuplements doit être considérée afin de minimiser leurs effets sur la vulnérabilité des jeunes peuplements en période d'épidémie. De cette façon, on prévient des baisses de rendement ligneux à moyen terme et on évite de faire des investissements qui risquent d'être perdus. La pertinence du traitement, la fenêtre d'opérabilité et l'évolution de l'épidémie sont des informations qui doivent être considérées pour évaluer les risques et faire un choix parmi différentes options telles que faire le traitement, le modifier, le différer ou l'annuler.

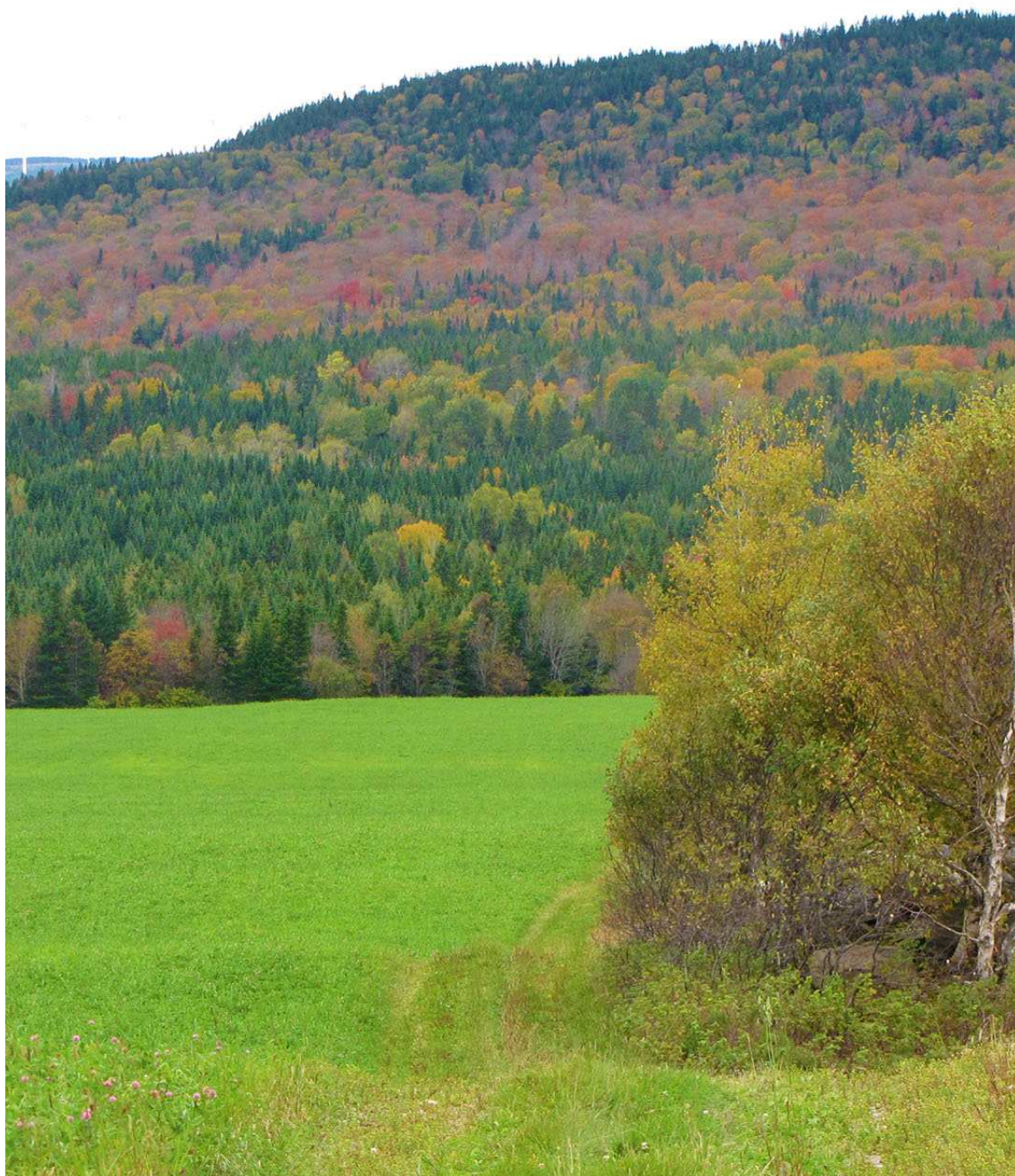
La **remise en production** pourra s'avérer nécessaire pour une partie des peuplements qui auront été réinitialisés par la récolte, par la tordeuse des bourgeons de l'épinette ou par une combinaison des deux, notamment lorsque la régénération n'est pas jugée adéquate en raison de sa quantité et de sa qualité. Le présent guide ne fournit toutefois pas d'indications précises à ce sujet.

L'option **Ne rien faire** peut aussi être envisagée. Dans certains cas, on pourra décider de ne rien faire parce que l'effet négatif à court terme pourra être compensé par un effet positif à moyen et à long terme. Il est important d'évaluer cette option, notamment pour les raisons suivantes :

- une insuffisance de marché;
- des peuplements susceptibles, mais peu ou pas vulnérables;
- des peuplements non rentables à récolter, à transformer et à mettre en marché (accessibilité, volume par hectare et volume par tige insuffisants).



Jeune plantation
d'épinettes



CHAPITRE 3

Orientations sylvicoles et ordonnancement de la récolte

Les orientations sur la modulation de la sylviculture présentées dans ce chapitre ont été développées en prenant pour acquis que le territoire concerné est en situation d'épidémie imminente (phase de préépidémie) ou en cours (début de la phase sans mortalité), et que le peuplement comporte des essences vulnérables à la tordeuse. Ce chapitre débute par l'explication des fondements physiologiques et biologiques sur lesquels s'appuie la sylviculture et les particularités à prendre en compte dans un contexte d'épidémie. Par la suite, des recommandations pour la modulation des traitements d'éducation sont faites pour des cas types de peuplements sur la base d'une évaluation des risques. Une troisième partie porte sur la modulation de la récolte dans les peuplements matures. Celle-ci s'appuie sur les notions présentées dans le chapitre 1 concernant le déroulement d'une épidémie ainsi que sur les résultats des outils d'analyse et de suivi présentés dans le chapitre 2.

3.1 Fondements physiologiques et biologiques

3.1.1 Considérations habituelles pour la sylviculture des résineux

Allocation des sucres

Chaque organisme vivant possède une quantité limitée d'énergie à dépenser. Chez les arbres résineux, l'allocation des sucres générés par la photosynthèse se fait selon un ordre de priorité bien défini. L'arbre utilise d'abord les sucres pour se maintenir en vie. Il les utilise ensuite pour croître en hauteur, puis en diamètre. En dernier lieu, il s'en sert pour produire des composés chimiques qui augmentent sa résistance aux insectes et aux maladies. Un résineux dont la photosynthèse est réduite à la suite d'un manque de lumière, d'une défoliation ou d'une pénurie en eau commencera donc par cesser la production des composés chimiques qui augmentent sa résistance aux insectes et aux maladies. Si la situation s'aggrave, il ralentira sa croissance en diamètre. Lorsque ce n'est pas suffisant, sa croissance en hauteur sera affectée et, si la photosynthèse est encore réduite, l'arbre finira par mourir.

Besoin en lumière des semis

Les sapins et les épinettes peuvent tolérer un ombrage important avant que leur croissance en hauteur et en diamètre soit affectée par le manque de lumière. La croissance des semis d'épinette n'est pas affectée aussi longtemps que la réduction de la lumière ne dépasse pas 40 %. Les semis de sapin sont encore plus tolérants, leur croissance commence à ralentir à partir d'une réduction de 60 % de la lumière. Au dessus de ces seuils on considère que les aiguilles sont saturées en lumière.

Hauteur potentielle de la végétation concurrente

La hauteur potentielle de la végétation concurrente influence la durée pendant laquelle les sapins et les épinettes subiront l'ombrage des espèces qui les entourent. Les espèces concurrentes peuvent être des plantes basses (framboisiers, graminées...), des arbustes (érables à épis, noisetiers...), ou encore des arbres (peupliers, bouleaux blancs, érables

rouges...). Pour une même perte de croissance, la décision d'intervenir sera influencée par la différence entre la hauteur de l'essence désirée et la hauteur potentielle des espèces concurrentes. Pour une espèce donnée, cette hauteur potentielle varie selon les stations, par exemple, la hauteur de l'érable de Pennsylvanie varie de 6 à 12 m selon les stations. Il est donc important de connaître la hauteur moyenne atteinte localement pour une espèce donnée.

Proportion du houppier

La proportion de houppier correspond au ratio de la longueur de la tige où se trouvent les branches vivantes sur la hauteur totale de l'arbre. Ce ratio est utilisé comme un indicateur de la masse foliaire. La diminution de la concurrence pour la lumière permet à l'arbre d'augmenter la proportion de son houppier, puisque c'est l'ombrage qui provoque la chute des aiguilles sur les branches inférieures.

Une forte proportion de houppier engendre des effets positifs comme une augmentation de la croissance en diamètre et une plus grande résistance aux insectes défoliateurs. L'arbre est aussi mieux enraciné puisque la masse racinaire est proportionnelle à la masse foliaire. En revanche, la forte proportion de houppier augmente la présence de nœuds et la quantité de bois juvénile (figure 13), ce qui entraîne une diminution de la résistance mécanique du bois. Le bois juvénile se forme à proximité des branches vivantes. Contrairement à l'aubier qui se transforme en bois de cœur avec le temps, le bois juvénile ne se transforme jamais en bois mature.

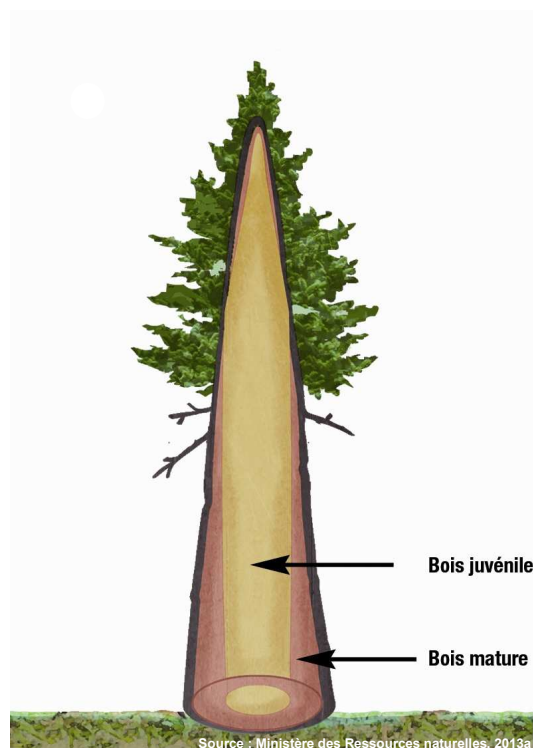


Figure 13 Représentation du bois juvénile et du bois mature

Dans les scénarios sylvicoles comportant des plantations ou des éclaircies précommerciales systématiques, l'espacement entre les arbres est contrôlé. Les sylviculteurs gèrent l'exposition des sapins et des épinettes à la lumière pour trouver un équilibre entre les effets positifs et négatifs liés à la proportion des houppiers. La fermeture graduelle du couvert entraîne la diminution du houppier. Lorsqu'il atteint entre 33 et 50 % de la hauteur de l'arbre et que la surface terrière se situe entre 25 et 35 m², on procède à une éclaircie commerciale. La proportion du houppier peut alors augmenter de nouveau jusqu'à ce que le couvert se referme et que le houppier recommence à diminuer. Une nouvelle éclaircie commerciale ou une coupe finale devra éventuellement être faite avant que le houppier ne devienne trop réduit. Après l'éclaircie commerciale, le bas des arbres ne comporte plus de branches vivantes et le volume qui s'y accumule est constitué de bois mature. Pour atteindre ce résultat, il a fallu provoquer une réduction de croissance en diamètre liée à la réduction du houppier avant l'éclaircie commerciale. Cette réduction de la croissance au bas de l'arbre permet de diminuer le défilement et améliore la proportion de l'arbre transformable en bois de sciage.

Quel que soit le scénario sylvicole, il faut éviter une trop grande diminution de la proportion du houppier des arbres dominants, car ils deviennent alors très vulnérables aux insectes défoliateurs et au chablis. La diminution de la masse foliaire peut réduire la production de sucre à un niveau où les mycorhizes se raréfient et ne recouvrent plus entièrement les racines, ce qui accroît l'entrée de champignons de carie. Le risque de chablis devient alors très élevé, car le nombre de racines est faible et plusieurs d'entre elles sont cariées. Dans ces conditions, les coupes partielles deviennent impossibles et la proportion de houppier des arbres ne peut plus être augmentée avec des éclaircies.

Différenciation sociale des arbres

La différenciation sociale des arbres est un processus naturel qui consiste à établir un gradient de dominance entre les arbres qui se côtoient. Elle permet à une partie des résineux de conserver une proportion de houppier acceptable malgré la présence d'un grand nombre d'arbres au départ. Les arbres dominants bénéficient d'une plus grande proportion de houppier, bien qu'ils soient en concurrence avec les arbres codominants pour la lumière. Ces derniers peuvent remplacer un arbre dominant lorsque celui-ci meurt. Les arbres dont la hauteur est inférieure au deux tiers de la hauteur des dominants sont considérés comme dominés; ils ne sont plus en concurrence pour la lumière avec les dominants. La plupart d'entre eux vont mourir lorsque le couvert se refermera, ce processus est appelé l'autoéclaircie.

Dans certaines situations, la différenciation sociale ne se fait pas naturellement. C'est le cas dans les jeunes sapinières qui ont environ 30 000 arbres de hauteur uniforme par hectare. La croissance en diamètre et en hauteur de ces peuplements stagne, car la proportion du houppier de chacun des arbres est réduite au point où la photosynthèse ne parvient qu'à les maintenir en vie. L'autoéclaircie ne se produit pas et on doit alors procéder minimalement à un dépressage au stade de semis ou de bas gaulis pour permettre à certains arbres de devenir dominants.

Les plantations sont un autre exemple où la différenciation sociale peut ne pas s'opérer naturellement. Les arbres ayant tous une hauteur semblable, on doit procéder à une éclaircie commerciale pour éviter que la diminution de la proportion de houppier rende le peuplement très vulnérable au chablis et aux insectes défoliateurs.

Occupation de l'espace de croissance

Pour le sapin baumier et les épinettes, la production de matière ligneuse par unité de superficie est quasi maximale à maturité avec une densité de 1200 arbres équidistants par hectare, ce qui correspond à un arbre par 8,33 m². Au-delà de ce seuil, une augmentation de la densité d'arbres augmente très peu le volume produit par hectare à maturité, mais elle fait diminuer la proportion de houppier et le volume par arbre. On considère donc qu'avec une densité de 1200 arbres équidistants par hectare, il y a une pleine occupation de l'espace de croissance pour la production en volume. La superficie de 8,33 m² correspond à l'espace de croissance de référence sur laquelle s'appuient les réflexions. La production d'un peuplement en volume par hectare est proportionnelle à la quantité d'espaces de croissance occupée par au moins un arbre.

Au Québec, lorsque les plantations sont aménagées avec une densité de 2000 arbres par hectare, cela correspond à l'établissement d'un arbre et deux tiers par espace de croissance. Lors de l'éclaircie commerciale, la récolte d'environ deux tiers d'arbre par espace de croissance (de 30 à 35 % de prélèvement) permet d'obtenir un peuplement ayant environ un arbre par espace de croissance. L'objectif poursuivi est de faire mourir les branches du bas lorsque les

arbres sont jeunes, avant qu'elles ne deviennent trop grosses, et de favoriser la croissance en diamètre au cours des dernières années. Il s'agit d'un compromis pour avoir de plus petits nœuds et moins de bois juvénile dans les billes de pied. Pour les mêmes raisons, les scénarios sylvicoles avec éclaircies précommerciales systématiques comportent toujours une éclaircie commerciale au stade de prématurité.

Résistance au chablis

La détermination du taux de prélèvement maximal du couvert pour les coupes partielles est conditionnée par les objectifs de gestion de la quantité de lumière au sol. Dans les peuplements de sapin et d'épinettes matures, la capacité du couvert résiduel à résister au chablis est une préoccupation additionnelle à cause de leur enracinement superficiel. Le sapin est l'essence la plus susceptible au chablis, suivi de l'épinette noire, puis de l'épinette blanche. La structure du peuplement a également beaucoup d'importance, les peuplements irréguliers étant plus résistants que les peuplements réguliers, car les arbres grandissent en étant plus exposés aux turbulences du vent et développent un meilleur ancrage au sol. Les sapinières régulières sont les plus fragiles et les taux de prélèvement recommandés se situent entre 20 et 40 %. Le taux de prélèvement peut se rapprocher de 50 % dans le cas de sapinières irrégulières ou de pessières blanches.

3.1.2 Considérations propres à un contexte d'épidémie

La vulnérabilité des sapins et des épinettes à la tordeuse des bourgeons de l'épinette augmente temporairement après tous les traitements sylvicoles qui modifient le couvert.

Cela se produit dans les jeunes peuplements, lors des travaux d'éducation, et dans les peuplements plus âgés, lors des coupes partielles. Les différentes hypothèses qui ont été proposées pour expliquer ce phénomène sont les suivantes :

- L'élimination d'une partie du couvert forestier entraîne des modifications dans l'environnement des arbres (quantité de lumière, température, humidité, nappe phréatique, etc.). Ces modifications engendrent un stress pour les arbres résiduels pendant quelques années, le temps qu'ils s'adaptent aux nouvelles conditions environnementales. Ce stress réduit leur capacité à se défendre contre la tordeuse des bourgeons de l'épinette.

La capacité d'acclimatation de l'arbre au changement de luminosité est grandement influencée par les traits fonctionnels de ses aiguilles avant l'intervention. Les aiguilles dites de lumière possèdent des traits leur permettant d'optimiser leur capacité photosynthétique tout en limitant le plus possible les pertes en eau, plus importantes en pleine lumière. Tel que mentionné précédemment, la quantité de lumière nécessaire pour saturer les aiguilles du sapin et des épinettes est peu élevée. Lorsque les aiguilles se sont développées avec une luminosité en dessous du seuil de saturation, elles acquièrent des traits fonctionnels liés à l'ombrage. Leur masse foliaire par unité de surface diminue proportionnellement au manque de lumière, de sorte que les aiguilles sont de plus en plus aplaties. La masse foliaire par unité de surface est un trait morphologique; une fois les aiguilles formées, il ne varie pas en fonction des conditions environnementales. Quand un changement de luminosité survient, l'arbre s'acclimate en produisant annuellement de nouvelles aiguilles adaptées à la luminosité. Si le changement de lumière est important, l'arbre peut subir un stress hydrique. Ce dernier peut même provoquer le rougissement ou la chute d'aiguilles. Cela prend environ cinq ans à un sapin pour changer complètement son feuillage. L'effet ne devrait pas durer 5 ans car, la capacité photosynthétique des aiguilles complètement formées est inversement proportionnelle à l'âge de celles-ci. Beauce et Fuentealba (2013)

ont démontré que pour une quantité fixe de chenilles par branche, l'augmentation de la vulnérabilité du sapin, due à des éclaircies précommerciales systématiques effectuées à la forêt Montmorency, avait cessé après 3 ans.

- L'augmentation de la quantité de lumière se traduit par une augmentation de la température, ce qui accélère le développement de l'insecte et favorise sa survie, puisqu'il est ainsi exposé moins longtemps aux facteurs naturels de contrôle des populations.
- Finalement, les traitements sylvicoles qui réduisent le nombre de sapins ou d'épinettes dans le peuplement concentrent la ponte des papillons sur les arbres résiduels et augmentent la quantité de chenilles sur ces arbres. Cet effet est très important et il influence la vulnérabilité aussi longtemps que la quantité de pousses annuelles est inférieure à celle que le peuplement aurait eu s'il n'avait pas été traité.

Cette augmentation temporaire de la vulnérabilité des arbres à la suite d'un traitement doit être prise en compte dans les orientations sylvicoles lorsqu'une épidémie est imminente ou en cours. En effet, de jeunes peuplements normalement peu vulnérables peuvent devenir très vulnérables après un traitement. L'augmentation de la vulnérabilité est proportionnelle à l'ouverture du couvert. Par exemple, une éclaircie commerciale augmentera peu la vulnérabilité, car le taux de prélèvement est relativement faible (environ 35 %) et ce sont principalement des arbres codominants qui sont prélevés, de sorte que l'augmentation de lumière sur les arbres dominants conservés est modérée. L'éclaircie précommerciale, par contre, peut entraîner une forte augmentation de la vulnérabilité lorsque les arbres conservés sont recouverts de feuillus intolérants ou entourés d'un grand nombre de résineux qui seront éliminés.

3.2 Modulation des traitements d'éducation

Cette section aborde la question des traitements sylvicoles généralement appliqués, en considérant leurs objectifs, les bénéfices attendus ainsi que l'effet prévu de la tordeuse des bourgeons de l'épinette afin d'évaluer le risque de procéder ou non à ces traitements. Des recommandations sont faites pour adapter les prescriptions sylvicoles aux périodes d'épidémie. Il est à noter que ce guide traite de cas généraux. Sur le terrain, le sylviculteur sera confronté à une variété de situations dont certaines ne sont pas abordées dans ce document. Toutefois, les principes évoqués et la démarche d'analyse proposée pour la prise de décision seront utiles pour l'ensemble des problématiques rencontrées.



Au Québec, le dégagement mécanique est la technique utilisée pour maîtriser la végétation concurrente dans les plantations et les peuplements naturels au stade de semis.

3.2.1 Superficies non ou mal régénérées en essences désirées

En l'absence de couvert, la seule option pour pallier un manque de régénération en essences désirées est la **plantation**.

Peuplements non régénérés en résineux

- Considérant que la plantation est peu risquée,
 - les essences habituellement utilisées au Québec pour la remise en production étant peu ou n'étant pas vulnérables à la tordeuse des bourgeons de l'épinette,
- il est recommandé
 - de poursuivre la plantation uniforme selon les critères usuels prévus.

3.2.2 Peuplements au stade de semis

Le stade de semis correspond à la période où les essences désirées ont un diamètre à hauteur de poitrine (DHP) inférieur à 1 cm, soit lorsque leur hauteur est inférieure à environ 2 m. À ce stade, les traitements d'éducation possibles sont le dépressage et le dégagement.

Le **dépressage** vise à éviter que de jeunes peuplements résineux très denses et sans différenciation sociale tombent en stagnation de croissance. Il s'agit habituellement de sapinières avec environ 30 000 arbres/ha et peu de végétation concurrente. Le traitement consiste à créer de petites ouvertures pour permettre la différenciation sociale dans la plupart des espaces de croissance. Il ne faut pas éliminer l'ensemble des résineux en surnombre, mais seulement donner plus de lumière à une portion des semis pour que certains puissent devenir dominants.

Peuplements fortement régénérés en sapin ou en épinettes

- Considérant que le dépressage n'est pas risqué, puisque
 - la modification du couvert est limitée,
 - que les semis sont peu vulnérables
 - et qu'un grand nombre de résineux demeure après traitement,
- et considérant que l'absence de dépressage conduirait le peuplement à la stagnation,
- il est recommandé
 - de procéder au dépressage lorsqu'il y a environ 30 000 semis/ha de sapin et d'épinettes dont la hauteur et l'exposition à la lumière sont semblables.

Le **dégagement** est le traitement à envisager lorsqu'il faut contrôler la végétation concurrente. Bien que la présence d'espèces concurrentes soit souvent impressionnante, son impact sur la croissance en hauteur des essences désirées est rarement important. Au stade de semis, c'est généralement la croissance en diamètre qui est affectée par la végétation concurrente. De plus, la croissance des épinettes est plus souvent ralentie que celle des sapins puisqu'elles ont besoin de plus de lumière.

Le recours au dégagement mécanique peut être utile pour maîtriser une végétation concurrente arbustive ou arborescente, mais le traitement a peu d'utilité lorsque la végétation concurrente est composée de plantes basses comme les graminées, les framboisiers, les fougères et les épilobes étant donné leur repousse rapide.

La diminution du houppier, qui engendre la diminution de la croissance en diamètre, se répercute au-delà du stade de semis. En effet, lors du nettoyage, lorsque les arbres n'ont pas été dégagés au stade de semis, la proportion de houppier est plus faible. Il faut plusieurs années de croissance après le nettoyage pour donner au houppier l'ampleur qu'il aurait eue si le dégagement avait eu lieu. La croissance en diamètre est donc réduite à la fois au stade de semis et durant une partie du stade de gaulis. L'impact de cette réduction de croissance en diamètre n'est pas négligeable, particulièrement dans les plantations au potentiel de production élevé composées d'épinettes, puisque ces dernières, qui ont un plus grand besoin de lumière, sont plus affectées.

Dans les plantations, le dégagement doit être fait dès que la luminosité franchit le seuil de lumière qui permet une pleine croissance en diamètre et en hauteur (60 % pour les épinettes). Le feuillage des semis est alors composé d'aiguilles de lumière ce qui minimise l'impact sur la résistance des arbres.

Habituellement, on ne fait pas de dégagement dans un peuplement qui se régénère naturellement. Toutefois, dans certains cas, la densité du couvert de la végétation concurrente peut compromettre la survie des semis d'essences désirées. Le dégagement est alors essentiel. On devrait commencer à craindre pour la survie des semis lorsque leur croissance en hauteur est inférieure à 50 % de leur croissance normale. Cela se produit habituellement sous un couvert arbustif dense d'érable à épis, de cerisier de Pennsylvanie, de noisetier ou de viorne à feuilles d'aulne. Avant d'intervenir, il faut toutefois s'assurer que la diminution de la croissance en hauteur est due au manque de lumière. En effet, cette diminution de croissance pourrait aussi être causée par la sécheresse, car la fermeture des stomates empêche les échanges gazeux et interrompt la photosynthèse. Elle pourrait aussi être une conséquence de la défoliation provoquée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Dans ce cas, le dégagement doit être proscrit, car il risque de favoriser davantage l'insecte au détriment des arbres.

Compte tenu des différences liées à l'impact de la croissance en diamètre et au risque de mortalité, les orientations diffèrent selon qu'il s'agit de plantations ou de peuplements naturels.

Plantations d'épinettes peu défoliées

- Considérant que le dégagement est peu risqué, puisque
 - l'augmentation de la vulnérabilité à court terme est faible étant donné que la majorité du feuillage devrait être constituée d'aiguilles de lumière
 - et que la vulnérabilité des épinettes avant dégagement est relativement faible,
- et considérant que l'absence de dégagement nuit beaucoup à la production de matière ligneuse, car
 - elle engendre une réduction de la croissance en diamètre
 - et que l'impact est amplifié par la forte productivité des plantations et la valeur du bois d'épinette,
- il est recommandé
 - de procéder au dégagement lorsqu'on constate une diminution de la croissance, causée par le manque de lumière dû à la présence d'une végétation concurrente arbustive ou arborescente.

Peuplements principalement régénérés en sapin

- Considérant que le dégagement est risqué, puisque
 - la vulnérabilité des sapins dégagés est élevée,
- et considérant que l'absence de dégagement nuit peu à la production, puisque
 - la réduction de la croissance en diamètre des sapins est plus faible en raison de leur plus grande tolérance à l'ombre,
 - la productivité des peuplements naturels est nettement inférieure à celle des plantations
 - et la valeur du bois de sapin est plus faible que celle du bois d'épinette,
- il est recommandé
 - de procéder au dégagement uniquement lorsque la survie des essences désirées est compromise par la présence d'une végétation concurrente arbustive ou arborescente. Il est suggéré d'intervenir lorsque leur croissance en hauteur a diminué de plus de 50 %.

3.2.3 Peuplements au stade de gaulis

Le stade de gaulis correspond à la période où les essences désirées ont un DHP supérieur à 1 cm, en général lorsque leur hauteur est supérieure à 2 m. À ce stade, les traitements d'éducation possibles sont le dépressage, l'éclaircie précommerciale par puits de lumière, le nettoyage et l'éclaircie précommerciale systématique.

Le **dépressage** se fait idéalement au stade de semis, mais il peut aussi être réalisé au stade de bas gaulis si la surabondance de résineux non différenciés n'a pas été constatée plus tôt.

Peuplements fortement régénérés en sapin et en épinettes

- Considérant que le dépressage n'est pas risqué, puisque
 - la modification du couvert est limitée
 - et qu'un grand nombre de résineux demeure après traitement,
- et considérant que l'absence de traitement entraîne la stagnation de la croissance, à moins que la mortalité partielle due à l'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette produise un effet de dépressage,
- il est recommandé
 - de procéder au dépressage lorsqu'il y a environ 30 000 semis/ha de sapins et d'épinettes sans différenciation sociale. Il est toutefois possible de retarder le dépressage si l'on estime que l'effet de la défoliation causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette va enclencher le processus de différenciation sociale; un suivi serré doit alors être fait. Advenant que le passage de la tordeuse des bourgeons de l'épinette ne provoque pas de différenciation sociale, il faudra faire le traitement.

L'**éclaircie précommerciale par puits de lumière** (EPC par puits de lumière) s'applique aux peuplements régénérés naturellement avec un bon coefficient de distribution de bouleau jaune, sur des sites propices à cette essence. Elle permet la maîtrise de la végétation concurrente uniquement à proximité des arbres d'avenir et modifie peu le couvert.

Peuplements régénérés avec un bon coefficient de distribution de bouleau jaune

- Considérant que
 - la maîtrise de la végétation concurrente est essentielle,
 - que l'EPC par puits de lumière augmente peu la vulnérabilité
 - et que la principale essence à promouvoir est le bouleau jaune,
- il est recommandé
 - de réaliser l'EPC par puits de lumière selon les critères usuels prévus.

Le **nettoisement** peut être utilisé dans des plantations ou des peuplements naturels. Dans les plantations, le nettoisement est le seul traitement d'éducation applicable pour maîtriser la végétation concurrente. Il est souvent appelé à tort « éclaircie précommerciale de plantation ». Les orientations pour ce traitement dans les plantations varient selon le type de végétation concurrente.

Plantations d'épinettes non défoliées, dominées par une végétation concurrente arbustive

- Considérant que le nettoyage est modérément risqué, puisque
 - la vulnérabilité des épinettes est relativement faible, mais que le nettoyage augmente la vulnérabilité,
- et considérant que l'impact de l'absence de nettoyage est variable, puisque
 - le bénéfice du traitement dépend de la période de temps requise pour que les essences désirées atteignent la hauteur potentielle de la végétation concurrente,
- il est recommandé
 - d'évaluer la pertinence du nettoyage en fonction de la réduction de croissance observée et de la durée prévue pour que les essences désirées atteignent la hauteur potentielle de la végétation concurrente.

Plantations d'épinettes dominées par une végétation concurrente arborescente qui occupera plus de 75 % du couvert au cours des prochaines décennies (ce qui est habituellement le cas pour les végétations potentielles MS₂, MS₁, MJ₁ et MJ₂)

- Considérant que le nettoyage est modérément risqué, puisque
 - la vulnérabilité initiale des épinettes est relativement faible, mais que le nettoyage augmente sa vulnérabilité,
- et considérant que l'absence de nettoyage compromet la production, puisque
 - les feuillus intolérants domineront le couvert durant des décennies,
- il est recommandé
 - de procéder au nettoyage selon les critères usuels prévus.

Dans les **peuplements régénérés naturellement où se trouvent des résineux et des feuillus intolérants**, mais aucun feuillu tolérant, deux traitements sont analysés : l'éclaircie précommerciale systématique et le nettoyage.

L'éclaircie précommerciale systématique (EPC systématique) permet, comme le nettoyage, de maîtriser la végétation concurrente. Elle est utilisée pour éliminer les résineux en surnombre et créer un espacement régulier entre les tiges afin d'en augmenter la croissance en diamètre. L'éclaircie précommerciale systématique permet d'accélérer le processus naturel d'autoéclaircie. Toutefois, les suivis des éclaircies précommerciales systématiques réalisées au Québec ont montré des gains de croissance en diamètre de seulement 1 cm après 25 ans. Certains sites ont mieux réagi, mais les connaissances actuelles ne permettent pas de définir les conditions qui mènent à un effet plus intéressant.

Généralement, le **nettoisement** sert uniquement à maîtriser la végétation concurrente sans éliminer les résineux en surnombre. Toutefois, on se questionne sur la pertinence d'éliminer les sapins qui entourent les épinettes noires lors du nettoisement. Des observations faites par les praticiens de la Côte-Nord dans la forêt publique concernant la défoliation des peuplements au stade de gaulis comportant un mélange de sapins et d'épinettes noires indiquent une augmentation proportionnelle de la défoliation sur les deux essences avec l'augmentation de la proportion de sapin. L'augmentation de la défoliation des épinettes noires pourrait s'expliquer par un transfert entre les arbres d'une partie des chenilles au cours de la saison de croissance. En effet, une partie des chenilles qui se laissent pendre à leur fil de soie se trouvent projetées par le vent sur un arbre voisin. Le principal mécanisme qui explique la plus forte résistance des épinettes noires est le débourrement plus tardif de leurs bourgeons. Au début de la saison, ce mécanisme entraîne un taux de mortalité important chez les jeunes chenilles qui doivent se nourrir sur de vieilles aiguilles avant l'ouverture des bourgeons. Une fois les bourgeons des épinettes noires ouverts, le nombre de chenilles est plus faible sur les épinettes noires que sur les sapins. Le transfert de chenilles entre les sapins et les épinettes se traduit par une augmentation du nombre de chenilles sur les épinettes noires et une diminution sur les sapins. Malgré ce mécanisme, il est possible que le maintien de l'ensemble des résineux en surnombre procure un effet protecteur plus élevé en répartissant la défoliation sur un plus grand nombre de branches. Il faudrait que le phénomène soit mieux documenté pour pouvoir juger si l'élimination des sapins au pourtour des épinettes est bénéfique et, dans l'affirmative, si le gain de protection justifie le coût de l'élimination des sapins. Ce questionnement ne concerne pas l'épinette blanche, car la diminution du nombre de chenilles sur cette essence est due à son aoûtement plus hâtif, le transfert de chenilles en cours de saison ne devrait donc pas augmenter la vulnérabilité des épinettes blanches. Le maintien des sapins qui entourent les épinettes blanches est recommandé.

Peuplements peu défoliés régénérés naturellement avec un grand nombre de résineux et dominés par des feuillus intolérants arborescents qui occuperont plus de 75 % du couvert au cours des prochaines décennies

- Considérant que la maîtrise des feuillus intolérants est requise
 - pour éviter qu'ils dominent le couvert durant des décennies,
- considérant que l'EPC systématique a de fortes chances d'entraîner une baisse de production en volume par hectare, puisque
 - la vulnérabilité des sapins augmente après l'ouverture du couvert
 - et que l'élimination des résineux en surnombre augmente le risque d'obtenir des espaces de croissance inoccupés advenant une mortalité partielle,
- et considérant que le gain en diamètre à la suite de l'EPC systématique sera trop faible pour justifier la perte de production en volume qui pourrait survenir après le passage de l'insecte,
- il est recommandé
 - d'utiliser uniquement le nettoisement et d'éviter l'EPC systématique jusqu'à la fin de l'épidémie.

3.2.4 Peuplements au stade de prématurité

À ce stade de développement, le principal traitement sylvicole utilisé pour poursuivre l'éducation des peuplements est l'éclaircie commerciale.

L'**éclaircie commerciale** permet la récolte d'une partie des arbres marchands d'une plantation ou d'un peuplement naturel de structure régulière afin de favoriser une augmentation de la croissance en diamètre des arbres conservés. Le traitement permet également de maintenir la vigueur des arbres en évitant que la fermeture du couvert entraîne une trop forte diminution de leur houppier. Afin de minimiser les risques de chablis dans les sapinières et les pessières, l'éclaircie commerciale ne devrait être utilisée que dans les peuplements éduqués, c'est-à-dire dans les peuplements qui sont issus d'une plantation ou qui ont fait l'objet d'une éclaircie précommerciale systématique. On exécute ce traitement à l'intérieur d'une fenêtre d'opérabilité bien précise. En effet, il faut éviter d'intervenir trop tôt pour laisser le temps aux branches situées dans le bas de l'arbre de mourir afin de diminuer la grosseur des nœuds et de produire un bois mature au lieu d'un bois juvénile. Il faut également éviter d'intervenir trop tard, car la faible proportion de houppier des arbres les rendrait inaptes à réagir à l'éclaircie. De plus, le risque de chablis serait trop élevé, le système racinaire ne procurant plus assez d'ancrage. Le taux de prélèvement de l'éclaircie commerciale est relativement faible et les arbres dominants sont peu récoltés. En conséquence, l'augmentation de la lumière sur les arbres éclaircis est modérée. L'augmentation de la vulnérabilité qui en découle devrait donc être plus faible que dans les autres traitements qui modifient le couvert.

Peuplements issus d'une éclaircie précommerciale systématique et dont plus de 40 % de la surface terrière est composée de sapin dans un territoire avec une forte proportion de peuplements vulnérables

- Considérant que l'éclaircie commerciale est risquée, puisque
 - le volume de sapin est trop élevé pour être récolté pendant la première intervention,
 - qu'une mortalité, du moins partielle, du sapin est probable
 - et que cette mortalité, ajoutée au prélèvement de 30 à 35 % de la surface terrière, risque de provoquer un chablis (l'éclaircie commerciale entraîne en effet un prélèvement qui correspond à la limite acceptable pour les sapinières de structure régulière; il n'y a donc pas de marge de manœuvre pour une diminution supplémentaire de la surface terrière causée par une mortalité probable),
- et considérant que l'absence de traitement est peu risquée, puisque
 - le risque d'une diminution excessive du houppier est modéré, étant donné que les arbres issus d'une éclaircie précommerciale systématique ont habituellement une certaine hétérogénéité en hauteur et qu'une mortalité partielle est attendue, la différenciation sociale devrait s'établir d'elle-même,
- il est recommandé
 - de cesser les éclaircies commerciales et d'attendre la fin de l'épidémie avant de recommencer.

Plantations d'épinettes comportant un maximum de 30 % de la surface terrière en sapin et ayant peu de différenciation sociale dans un territoire avec une forte proportion de peuplements vulnérables (Les peuplements qui ont fait l'objet d'EPC systématiques et qui comportent au moins 70 % d'épinettes peuvent être assimilés à ces plantations si leur différenciation sociale est faible.)

- Considérant que l'éclaircie commerciale est peu risquée, puisque
 - la majorité du volume de sapin peut être récolté lors de la première intervention,
 - qu'une mortalité partielle des épinettes est peu probable
 - et que le risque de chablis est faible, les plantations d'épinettes étant plus résistantes au vent que les sapinières (après l'ouverture du couvert créée par le traitement, ces plantations pourraient tolérer une ouverture additionnelle de 5 à 15 % s'il y avait une mortalité partielle),
- et considérant que l'absence de traitement est très risquée, puisque
 - la diminution excessive du houppier est probable, les arbres des plantations ayant habituellement une hauteur très homogène,
- lorsque l'épidémie est imminente ou a débuté,
- il est recommandé
 - d'effectuer les éclaircies commerciales et de récolter les sapins en priorité,
- et lorsque les défoliations répétées ont réduit la masse foliaire à moins de 50 %,
- il est recommandé
 - de suivre l'évolution de la mortalité. Dès qu'on estime que la mortalité dépasse 40 % du couvert, l'ensemble des arbres devrait être récupéré, car les coupes partielles ne sont alors plus possibles. Lorsqu'on estime que la mortalité a cessé et qu'elle est inférieure à 40 % du couvert, on peut procéder à une éclaircie commerciale si la mortalité est faible ou s'inspirer des coupes progressives pour faire la récupération.

3.3 Modulation de la récolte dans les peuplements matures

La modulation de la récolte des peuplements ayant atteint la maturité est plus complexe que celle des traitements d'éducation présentés dans la section précédente. Elle nécessite des analyses approfondies pour encadrer les actions sylvicoles en fonction des objectifs d'aménagement.

Afin de bien structurer cette modulation, les principaux procédés de régénération concernés sont présentés, puis la pertinence de procéder à des coupes progressives est examinée en fonction des objectifs d'aménagement. Une fois ces éléments de base décrits, une section énonce les deux grands principes à prendre en compte pour orienter la récolte. Ces derniers permettront de maximiser l'atteinte des objectifs de l'approche de gestion présentés dans l'introduction de ce guide. Finalement, un ordonnancement des coupes progressives et totales est proposé afin que le respect de ces principes soit adapté au déroulement de l'épidémie.

3.3.1 Procédés de régénération concernés

Les principaux procédés de régénération applicables aux peuplements ayant atteint la maturité et qui comportent des essences vulnérables à la tordeuse des bourgeons de l'épinette appartiennent à la **famille des coupes totales** ou à la **famille des coupes progressives**. La majorité des réflexions portera donc sur les procédés de régénération de ces deux familles. Deux autres procédés de régénération, soit la **coupe avec protection des petites tiges marchandes** (CPPTM) et la **coupe de succession** (CS), seront toutefois succinctement abordés à la fin du chapitre.

Les principaux traitements de la famille des coupes totales sont la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) et la coupe avec protection de la haute régénération et des sols (CPHRS).

La famille des coupes progressives est composée de la coupe progressive régulière (CPR), de la coupe progressive irrégulière à régénération lente (CPI-RL) et de la coupe progressive à couvert permanent (CPI-CP). La CPR et la CPI-RL comportent une phase de coupe finale qui implique la récolte de la quasi-totalité des tiges commerciales. La CPR maintient le couvert mature pendant moins de 20 % de la révolution (moins de 20 ans) et la CPI-RL pendant plus de 20 % de la révolution. Quant à la CPI-CP, elle conserve un couvert mature en tout temps.

Plus le couvert mature est maintenu longtemps, plus l'ensemble des bénéfices associés aux coupes progressives sera élevé. La capacité à maintenir le couvert est fonction de la proportion d'essences longévives et de bonne vigueur ainsi que de la complexité de la structure actuelle du peuplement.

3.3.2 Les coupes progressives sont-elles souhaitables et possibles?

Les bénéfices anticipés des coupes progressives concernent l'établissement de la régénération sous couvert, le maintien de conditions microclimatiques, la maîtrise de la végétation concurrente intolérante à l'ombre, l'étalement de la récolte en fonction de la maturité des essences et le maintien de structures complexes pour répondre à des enjeux de biodiversité, de composition en essences ou de paysage. Chacun de ces aspects doit être examiné pour déterminer jusqu'à quel point les coupes progressives sont souhaitables dans un peuplement donné. Dans certains cas, un seul motif peut être suffisant pour qu'elles soient préférables aux coupes totales, alors que dans d'autres cas, c'est l'accumulation des aspects positifs qui finit par dépasser les avantages des coupes totales. Les éléments qui varient en fonction des végétations potentielles sont présentés dans le tableau 12.



Éclaircie commerciale dans une plantation

Tableau 12 Essences en raréfaction favorisées par les coupes progressives et concurrence pour la lumière des essences à maîtriser dans les végétations potentielles comportant beaucoup de sapins

Caractéristiques de la végétation potentielle	Végétation potentielle						
	RS3	RC3	RS5	RS2	RS1	MS2	MS1-MJ1-MJ2
	Sapinière à épinette noire et à sphaigne	Cédrière tourbeuse à sapin	Sapinière à épinette rouge	Sapinière à épinette noire	Sapinière à thuya	Sapinière à bouleau blanc	Sapinière à bouleau jaune et bétulaie jaune à sapin
Établissement de la régénération naturelle d'essences en raréfaction		Thuya	Épinette rouge		Thuya	Épinette blanche	Épinettes rouge et blanche et bouleau jaune
Conditions de croissance essentielles							Épinette rouge
Concurrence pour la lumière des espèces à maîtriser intolérantes à l'ombre	Inexistante	Inexistante	Faible	Moyenne	Moyenne	Forte	Très forte
Concurrence pour la lumière des espèces à maîtriser semi-tolérantes et tolérantes à l'ombre	Inexistante	Inexistante	Inexistante	Inexistante	Parfois forte	Parfois forte	Souvent forte

L'établissement de la régénération nécessite la présence de lits de germination. Lorsque l'humus est mince, avec une épaisseur de moins de 5 à 10 cm, la récolte en l'absence de neige au sol est suffisante pour créer les lits de germination. Lorsque l'humus est plus épais, un scarifiage sous couvert est requis et l'installation de la régénération peut uniquement compléter la régénération naturelle. En période d'épidémie, des restrictions particulières s'appliquent. Les fleurs, qui se transforment habituellement en cônes contenant les semences, sont la nourriture de prédilection de la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Lorsque la défoliation est commencée, on ne peut plus compter sur la présence de semences dans les sapins et les épinettes rouges et blanches. Les cônes semi-sérotineux des épinettes noires peuvent contenir des semences pendant quatre ans, ce qui retarde un peu le phénomène pour cette essence. Pour les essences vulnérables, la prochaine intervention des coupes progressives dépend donc de la présence d'une régénération préétablie. Dans le cas des essences non susceptibles, les coupes progressives sont essentielles pour établir la régénération des essences qui ne peuvent faire l'objet d'un reboisement, comme le bouleau jaune, ou qui sont rarement reboisées, comme le thuya. Habituellement, les forestiers considèrent les coupes progressives souhaitables lorsque le couvert comprend une bonne proportion de bouleau jaune, de thuya ou d'épinette rouge. La proportion minimale du couvert varie entre 25 et 50 % selon le contexte régional. Idéalement, ces peuplements sont traités avec une coupe progressive irrégulière à couvert permanent. Toutefois, si la vigueur, la proportion d'essences longévives ou la complexité de la structure sont insuffisantes, le recours à la coupe progressive régulière ou à la coupe progressive irrégulière à régénération lente peut être nécessaire pour conduire graduellement le peuplement vers un état qui permettra éventuellement de recourir à la coupe progressive irrégulière à couvert permanent.

Les coupes progressives sont nécessaires pour **maintenir les conditions microclimatiques propices à la croissance de l'épinette rouge** dans les sapinières à bouleau jaune ou les bétulaies jaunes à sapin. Toutefois, ce n'est pas indispensable dans la sapinière à épinette rouge (RS5), car les épinettes rouges établies dans ces stations sont hybridées avec des épinettes noires et peuvent résister aux coupes totales. Le recours aux coupes progressives dans la sapinière à épinette rouge imite toutefois mieux la dynamique naturelle.

Les coupes progressives permettent de **maintenir des conditions d'humidité qui favorisent la survie de la basse régénération**. Lorsque les semis ont moins de 30 cm, plus ils sont petits et clairsemés, plus il est risqué de procéder à des coupes totales.

La maîtrise de la végétation concurrente intolérante à l'ombre est un des principaux motifs d'utilisation des coupes progressives lorsqu'on ne désire pas faire d'éclaircie précommerciale systématique et qu'on veut réduire l'utilisation du nettoyage. L'intensité de la concurrence des espèces intolérantes à l'ombre est généralement proportionnelle à la fertilité de la station et l'intérêt d'utiliser ces coupes pour contrôler la végétation concurrente devrait croître avec l'augmentation de la fertilité. Toutefois, sur les stations les plus fertiles, on trouve aussi des espèces à maîtriser qui sont semi-tolérantes ou tolérantes à l'ombre, comme l'érable à épis, la viorne bois-d'orignal, le noisetier à long bec, l'érable de Pennsylvanie et l'érable rouge. Les coupes progressives engendrent des conditions de lumière qui sont optimales pour ces espèces. Dans certains cas, des dégagements sous couvert pourraient être requis pour rabattre ces espèces, ce qui réduit l'intérêt économique de ce type de coupe lorsque la maîtrise de la végétation concurrente est la seule motivation. Pour évaluer la probabilité d'avoir à réaliser un dégagement sous couvert, on doit prendre en compte la vigueur de ces espèces sur la station, leur densité et la hauteur des espèces arbustives, comme l'érable à épis, dans le peuplement au moment de la coupe.

Néanmoins, il peut s'avérer moins dispendieux de maîtriser la végétation concurrente en maintenant l'ombrage au moyen de coupes progressives par rapport à un scénario de coupe totale suivi de traitements de dégagement et de nettoyage. La capacité de protéger la haute régénération au moment de la récolte finale est essentielle pour pouvoir en bénéficier, la récolte mécanisée des feuillus est souvent problématique en raison de la largeur de leur houppier et peut compromettre l'atteinte de l'objectif. Lorsque la régénération désirée est préétablie, il est possible d'utiliser l'ombrage de tout type de couvert. Toutefois, en situation d'épidémie, si la maîtrise de la végétation concurrente est la seule motivation, il est peu probable que les coupes progressives soient retenues lorsque le couvert comporte trop de sapin pour qu'elles puissent être appliquées en début d'épidémie.

L'étalement de la récolte en fonction de la maturité des essences peut être un des objectifs. Par exemple, dans un peuplement mixte composé de peuplier et de sapin, le peuplier peut arriver à maturité avant le sapin et sa récolte est habituellement faite à la première intervention. Dans le contexte de l'épidémie, c'est le sapin qu'il faudrait récolter en premier. L'arrivée de l'épidémie compromet donc parfois la capacité d'atteindre cet objectif.

Le maintien d'une structure de vieille forêt est un objectif que seules les coupes progressives permettent de réaliser tout en procédant à la récolte. Cet objectif est envisageable même si le couvert est dominé par le sapin. La coupe progressive doit alors être reportée après l'épidémie et on doit surveiller l'évolution de la mortalité afin de procéder à une coupe totale si la situation l'exige. Les vieilles forêts ne sont pas composées uniquement de vieux arbres, il s'agit de peuplements qui ont une structure irrégulière, ce qui rend possible un taux de prélèvement plus élevé sans risque excessif de chablis lorsqu'une coupe partielle de récupération est nécessaire. De plus, lorsque la structure comporte plus de deux étages, plusieurs arbres ont une forte proportion de houppier ce qui les rend moins vulnérables.

Le maintien du paysage et de l'ambiance forestière sont aussi des objectifs qui peuvent inciter les propriétaires à favoriser l'utilisation des coupes progressives. Dans certains cas, les coupes totales peuvent même être proscrites dans les réglementations municipales par exemple.

Même lorsqu'on souhaite faire des coupes progressives, cela peut s'avérer impossible. Le recours aux coupes totales devient alors la seule option pour effectuer la récolte. En effet, une trop forte proportion de carie ou un mauvais enracinement peut rendre le **risque de chablis** inacceptable. De même, lorsque le peuplement est juxtaposé à de grandes ouvertures non boisées, son exposition au vent pourrait être trop élevée, surtout si la structure du peuplement est régulière. Il est tout de même possible de faire une coupe progressive si on maintient une bande non traitée en bordure du peuplement. La largeur requise de cette bande dépend des conditions locales. Le **degré de fermeture du couvert** est également important. Si la projection au sol des houppiers n'est pas d'au moins 60 % avant la coupe dans les peuplements réguliers ou de 40 % dans les peuplements irréguliers, il sera difficile de maintenir suffisamment d'ombrage au sol pour maîtriser la végétation concurrente intolérante à l'ombre. Finalement, la **capacité de revenir dans le peuplement** pour procéder à d'autres interventions est essentielle.

3.3.3 Principes orientant la récolte

Deux principes guident les sylviculteurs dans le choix des peuplements à récolter et des procédés de régénération à utiliser pendant l'épidémie. Ceux-ci viennent appuyer l'atteinte des objectifs de l'approche de gestion qui vise à minimiser les pertes de revenus pour les propriétaires, mais également à maintenir un capital forestier à moyen et à long terme en favorisant le maintien des arbres et des peuplements qui devraient se maintenir et conserver leur valeur actuelle ou potentielle.

- 1) *Pour diminuer les pertes de revenus pour les propriétaires, il faut diriger la récolte sur les arbres qui ont la plus forte probabilité de mourir.*

Les sources d'information qui servent à orienter la récolte varient selon le déroulement de l'épidémie. Lors de la phase de préépidémie, on utilise la vulnérabilité des peuplements pour orienter la récolte (voir les sections 2.2.1). Lorsque la défoliation débute, lors de la phase sans mortalité de l'épidémie, on tient compte de cette défoliation dans les peuplements où elle excède 50 %. Lorsque la mortalité débute, c'est son intensité qui guide les choix (voir la section 2.3.5). Comme la mortalité causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette s'étend sur plusieurs années, dans bien des cas les coupes de récupération seront caractérisées par une récolte d'arbres vivants et morts.

Dans les chapitres précédents, il a été démontré que ce ne sont pas tous les peuplements qui seront réinitialisés par l'épidémie. Il est donc préférable que la récolte de certains peuplements peu ou pas vulnérables, comme les pessières, les mélézins, les pinèdes grises et les peuplements de haute altitude, soit reportée après l'épidémie. De plus, parmi les peuplements comportant une forte proportion de sapin, certains seront touchés par une mortalité partielle et d'autres pourraient être épargnés. **Il serait donc inapproprié de traiter rapidement tous les peuplements comprenant du sapin avec des coupes totales, car cela signifierait renoncer à plusieurs objectifs sylvicoles et écologiques que les coupes progressives permettent d'atteindre.**

2) La proportion de sapin dans le peuplement détermine la période de l'épidémie durant laquelle il faut procéder à des coupes progressives.

Lorsque la proportion de sapin est suffisamment faible pour que celui-ci soit presque totalement prélevé dès la première intervention, il est avantageux de réaliser les coupes progressives lors de la phase de préépidémie ou au début de l'épidémie. Dans les peuplements ayant une plus forte proportion de sapin, on ne peut faire de coupes progressives à ce stade de l'épidémie, car le risque de chablis est alors trop élevé. Une mortalité partielle des sapins résiduels, ajoutée au prélèvement, entraînerait une trop grande ouverture du couvert. Les coupes progressives dans ces peuplements devront donc être reportées à la fin de l'épidémie. De plus, il faudra suivre l'évolution de la défoliation totale et de la mortalité effective de près dans ces peuplements, car une mortalité de plus de 40 % du couvert compromet la possibilité de réaliser ce type de traitement. Plus on souhaite réaliser une coupe progressive, plus les informations montrant son impossibilité devront être fiables. En revanche, plus la décision de procéder à une coupe totale sera prise rapidement, moins il y aura de pertes de volume et de qualité.

Il existe toutefois une exception au report des coupes progressives après l'épidémie lorsque la proportion de sapin est trop grande. Si le maintien du couvert pendant seulement une courte période est acceptable, il est possible de réaliser une première intervention pendant que le peuplement est peu défolié ou qu'il ne l'est pas encore, et de procéder à la coupe finale dès que la défoliation totale devient trop élevée. Cette courte période pourrait servir dans le cas de peuplements avec une régénération préétablie très basse (inférieure à 30 cm) et clairsemée. Dans ce cas, la coupe progressive régulière viserait principalement à maintenir des conditions adéquates d'humidité jusqu'à ce que les semis soient mieux développés et moins vulnérables à la sécheresse lors de l'ouverture complète du couvert.



Coupe progressive dans un peuplement résineux

3.3.4 Ordonnancement des coupes progressives et totales en fonction du déroulement de l'épidémie

Le tableau 13 résume l'ordonnancement de la récolte en fonction du déroulement de l'épidémie selon que la coupe progressive est souhaitable et possible ou qu'elle ne l'est pas.

Tableau 13 Ordonnancement de la récolte en fonction du déroulement de l'épidémie

Famille de coupes souhaitées	ENDÉMIE	ÉPIDÉMIE (Échelle du peuplement)			ENDÉMIE	
	Phase de préépidémie	Phase sans mortalité		Phase avec mortalité	Phase de post-épidémie	Phase stable
	Défoliation annuelle faible	< 50 % de défoliation totale	> 50 % de défoliation totale	Défoliation variable selon les arbres	Reprise progressive des survivants	Aucune défoliation
Coupes progressives	Faire les coupes progressives dans les peuplements où la proportion de sapin est modérée		Attendre l'évolution de l'épidémie. Si la mortalité anticipée excède 40 %, procéder à une coupe totale de récupération.		Faire les coupes partielles de récupération.	Reprendre les coupes progressives dans les peuplements non touchés.
Coupes totales (coupes progressives non souhaitables ou impossibles)	Faire les coupes totales dans les peuplements à faible persistance	Faire les coupes totales dans les peuplements les plus défoliés.	Faire les coupes totales de récupération dans les peuplements les plus touchés.	Terminer la récupération en utilisant au besoin des coupes partielles pour diminuer le flux de résineux.		Reprendre les coupes totales dans les pinèdes grises, mélèzins, pessières et peuplement en haute altitude

3.3.5 Coupe avec protection des petites tiges marchandes et coupe de succession

La présence d'une régénération sous couvert, comportant une quantité importante de gaules et de petites tiges marchandes résineuses, permet d'utiliser des coupes partielles où la quasi-totalité du volume marchand est prélevée. Lorsque le couvert comporte des résineux, on opte pour une coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM). Si le couvert est constitué uniquement de feuillus intolérants, c'est alors la coupe de succession (CS) qui est appropriée. Dans le cas de la CPPTM, l'exclusion de la récolte des petites tiges marchandes résineuses nécessite l'évaluation de leur probabilité de survie. Si elles sont déjà fortement défoliées, elles ne devraient pas être exclues de la récolte. Le traitement approprié serait plutôt une coupe avec protection de la haute régénération et des sols (CPHRS). Cette évaluation n'est pas requise avec la coupe de succession, puisque les petites tiges marchandes résineuses sont toujours exclues de la récolte. En effet, étant donné qu'il n'y a pas de récolte de résineux dans le couvert, la récolte des petites tiges marchandes résineuses n'est pas rentable.

La récolte de la quasi-totalité du volume marchand à l'aide de ces deux traitements modifie beaucoup le couvert et augmente substantiellement la vulnérabilité des arbres conservés. Il est préférable, lorsque c'est possible, de reporter la récolte jusqu'à ce que l'épidémie soit terminée. Les coupes progressives peuvent également être envisagées pour ouvrir graduellement le couvert. Par exemple, la coupe progressive régulière par bande pourrait être évaluée. La largeur de la bande correspondrait environ à une hauteur d'arbre et pourrait être orientée en fonction de l'exposition au soleil.



CONCLUSION

Tout porte à croire que l'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette continuera de s'étendre tant en superficie qu'en intensité au cours des prochaines années. Pour les régions touchées, sa prise en compte dans la planification des interventions en forêt est essentielle pour ne pas aggraver ses effets négatifs. Pour ce faire, il faut bien comprendre les facteurs qui influencent la vulnérabilité des peuplements de même que la façon dont se déroule une épidémie et comment la mortalité progresse. Bien que les indications permettant de prévoir les effets des différents traitements sylvicoles en période d'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette demeurent très fragmentaires, c'est grâce à nos connaissances sur la vulnérabilité des essences et des peuplements ainsi que sur la réaction physiologique des arbres à la suite des traitements qu'il est possible d'anticiper les conséquences probables de certains traitements lors d'une épidémie imminente ou en cours. Toutefois, il est important de se rappeler qu'une grande incertitude demeure au sujet des résultats de ces actions, ce qui devrait inciter les sylviculteurs à agir selon le principe de précaution et à en revoir la pertinence et les modalités annuellement. Les décisions concernant l'application ou la modulation d'un traitement sylvicole doivent être prises dans une optique de gestion du risque et de gestion adaptative, après avoir consciencieusement analysé l'ensemble des informations sylvicoles et biologiques de même que les considérations socioéconomiques nécessaires à une prise de décision éclairée. Pour tirer profit de cette « expérience » en période d'épidémie, il est primordial de suivre de près et de documenter les effets combinés des traitements et de la défoliation au moyen de dispositifs de suivi structurés. En terminant, il faut rappeler qu'au cours des deux derniers siècles, la tordeuse des bourgeons de l'épinette a été de plus en plus présente dans nos forêts, en partie à cause de l'influence anthropique directe et indirecte, et que malgré cela elles sont tout de même demeurées productives. La tordeuse fait partie du processus naturel de succession forestière parce qu'elle favorise la régénération de plusieurs écosystèmes forestiers et qu'elle modifie la composition et la densité d'une grande partie de ceux dans lesquels le sapin occupe une place importante.



Paysage automnal façonné par la tordeuse des bourgeons de l'épinette



ANNEXE A

Vocabulaire relatif à l'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette

Voici la définition de quelques termes et notions propres aux épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette.

1. Défoliation

Certains termes liés à la défoliation viennent en préciser le sens. C'est le cas pour la **défoliation annuelle**, la **défoliation annuelle cumulée** (défoliation cumulative) et la **défoliation totale**. La défoliation est mesurée sur les essences susceptibles à la tordeuse des bourgeons de l'épinette, à savoir le sapin baumier, l'épinette blanche, l'épinette rouge et l'épinette noire.

Défoliation annuelle

La défoliation des pousses annuelles des essences susceptibles peut être estimée de quatre façons :

- Sur le terrain, à l'aide de jumelles, généralement selon des classes de 10 % (Fettes, 1950), par arbre ou partie d'arbre ou par placette d'étude.
- En laboratoire, selon des classes de 10 % (Fettes, 1950), à partir d'une branche prise généralement dans le tiers médian du houppier.
- En aéronef, selon des classes servant à décrire l'étendue et la gravité de la défoliation annuelle (Thériault, 2002) : légère (de 1 à 35 %); modérée (de 36 à 70 %); grave (de 71 à 100 %) (voir l'encadré intitulé « Méthodologie pour la production des cartes de défoliation des pousses annuelles » à la section 2.2.3).
- À partir d'images satellitaires, pour la localisation générale de secteurs avec présence de défoliation annuelle, entre autres dans les régions éloignées.

Défoliation annuelle cumulée (défoliation cumulative)

Cumulation des données de défoliation annuelle pour obtenir un indice de la gravité de la défoliation à une échelle pour laquelle l'historique de défoliation annuelle est disponible (arbre, placette, territoire). Dans un territoire donné, on utilise cette information pour déterminer les secteurs où il est souhaitable de procéder à une évaluation plus précise. La défoliation annuelle cumulée est un indice de la gravité de l'épidémie, permettant d'établir la probabilité de mortalité.

Défoliation totale

Il s'agit de la défoliation évaluée sur l'ensemble de l'arbre en fonction de la masse de feuillage présumée. C'est une évaluation qui permet d'établir avec plus de précision la probabilité de mortalité des arbres, puisqu'elle donne un aperçu de l'état des arbres par observation directe, contrairement à la défoliation cumulative décrite plus haut. Comme pour la défoliation annuelle, la défoliation totale peut être évaluée pour un arbre, un groupe d'arbres ou un territoire (voir la section 2.2.5).

2. Mortalité

Au sens biologique, un arbre est considéré comme mort lorsque son cambium est mort sur toute la périphérie du tronc. Si l'arbre est mort, la couleur du cambium sera orangée au lieu de beige pâle. D'autres signes apparents témoignent de la mort de l'arbre : la présence de trous d'insectes, le soulèvement de l'écorce, les trous de pics-bois, une cassure dans la tête de l'arbre, etc. À l'échelle d'un territoire, on considère comme morts les arbres qui n'ont plus de feuillage vivant.

L'importance de la mortalité peut être estimée directement sur le terrain, arbre par arbre. À l'échelle d'un peuplement, on peut procéder par échantillonnage. Pour un territoire plus vaste, on peut faire des évaluations visuelles à partir d'un aéronef ou interpréter des photographies aériennes ou des images satellitaires, auquel cas il est recommandé de procéder à des validations sur le terrain.

3. Épidémie et endémie

Dans ce document, nous présentons une échelle temporelle applicable à la fois au niveau de populations de l'insecte et à la période où les dommages sont visibles. Nous utilisons les termes « **épidémie** » et « **endémie** » pour désigner ces périodes.

Épidémie

Au sens propre, le terme « épidémie » fait habituellement référence à une maladie. Son utilisation s'est élargie pour désigner divers autres phénomènes toujours liés à la notion d'éruption, de déclenchement ou d'explosion. En anglais, c'est le terme *outbreak* qui est généralement employé.

Pour les entomologistes, ce terme désigne la période caractérisée par la montée et le maintien des populations de la tordeuse des bourgeons de l'épinette au-delà d'un seuil donné. Pour les chercheurs qui étudient l'histoire des épidémies, leur reconstitution est généralement basée sur les patrons de croissance d'arbres susceptibles, survivants ou morts, mais bien conservés. Les forestiers parlent généralement d'épidémie pour décrire la période pendant laquelle la défoliation est facilement observable. Pour les photo-interprètes forestiers, le terme « épidémie » est utilisé pour caractériser les perturbations totales ou partielles causées par un insecte (une épidémie grave [ES] correspond à une réduction de plus de 75 % de la surface terrière tandis qu'une épidémie modérée [EL] correspond à une réduction qui se situe entre 25 et 75 %). L'inventaire forestier ne fournit cependant pas d'informations sur l'insecte qui a causé la réduction de la surface terrière. Il y a alors lieu de consulter les informations provenant du monitoring des insectes pour associer correctement les perturbations aux bons agents.

Dans le présent guide, on parle d'épidémie lorsque la défoliation devient apparente. Selon l'effet cumulé de la défoliation, la période d'épidémie est subdivisée en deux phases : une phase **sans mortalité significative** des arbres durant laquelle la défoliation se répète annuellement et une phase **avec mortalité** où il y a une progression significative de la mortalité associée à la défoliation annuelle (voir le tableau 1 à la section 1.5). Le passage d'une phase à l'autre n'est cependant pas toujours facile à apprécier.

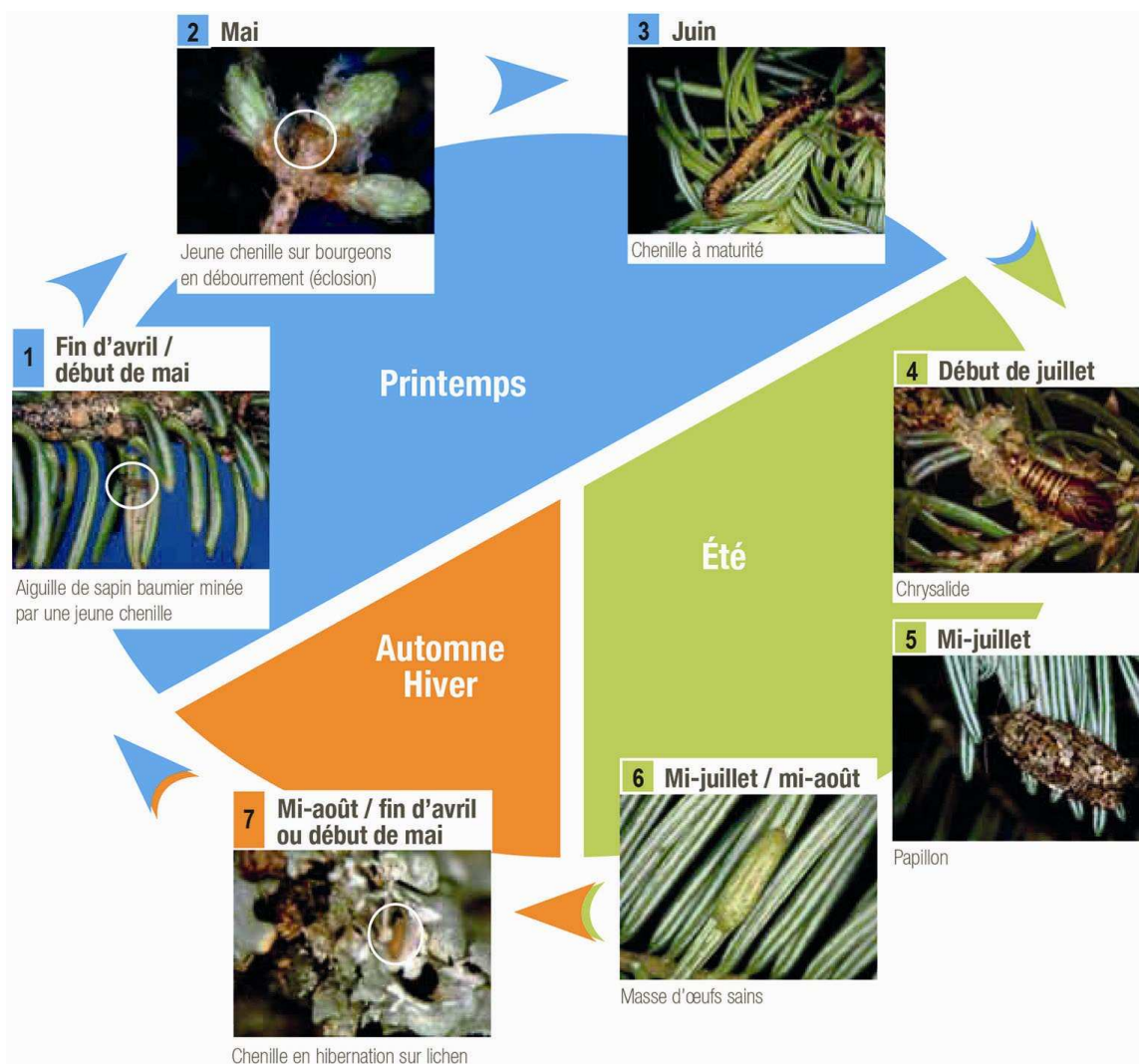
Endémie

Dans le présent guide, la période où la défoliation n'est pas apparente est l'endémie. Cette période se subdivise en trois phases : la post-épidémie, l'endémie stable et la préépidémie. Au cours de la **phase de post-épidémie**, les populations sont en baisse, la défoliation annuelle est peu apparente, mais des arbres affaiblis par la défoliation répétée peuvent mourir. La **phase d'endémie stable** est caractérisée par des populations très faibles, difficiles à détecter et à mesurer. La **phase de préépidémie** est caractérisée par le retour de populations mesurables et à la hausse (voir le tableau 1 à la section 1.5).



ANNEXE B

Cycle vital de la tordeuse des bourgeons de l'épinette



On l'observe :

au printemps

- 1** dans les aiguilles*
- 2** dans les bourgeons*
- 3** sur un nouveau feuillage

à l'été

- 4** attachée au feuillage, elle se transforme en papillon
- 5** elle vole dans la cime des arbres et s'accouple
- 6** les œufs sont déposés sur la face inférieure des aiguilles

à l'automne - hiver

- 7** la jeune chenille se tisse un abri (hibernacle) dans les lichens, les crevasses de l'écorce ou les anciens bourgeons floraux

* La jeune chenille mine les vieilles aiguilles en attendant le débourrement des bourgeons.

Note : Les périodes du cycle peuvent varier selon la région et la météo.

ANNEXE C

Évaluation de la défoliation totale des arbres¹

L'évaluation de la défoliation totale des arbres causée par leur défoliation annuelle répétée est une façon simple de déterminer l'état de santé des peuplements. Elle doit être faite lorsque le feuillage mort et rougi, situé à l'extrémité des branches, est tombé et ne masque plus le feuillage vert restant. Cette période se situe entre la mi-août et le début de juin de l'année suivante. Par ailleurs, l'évaluation ne peut pas être faite lorsque les arbres sont couverts de neige.

L'évaluation de la défoliation totale d'un arbre se fait en fonction de quatre classes basées sur la masse présumée du feuillage de l'arbre avant la défoliation :

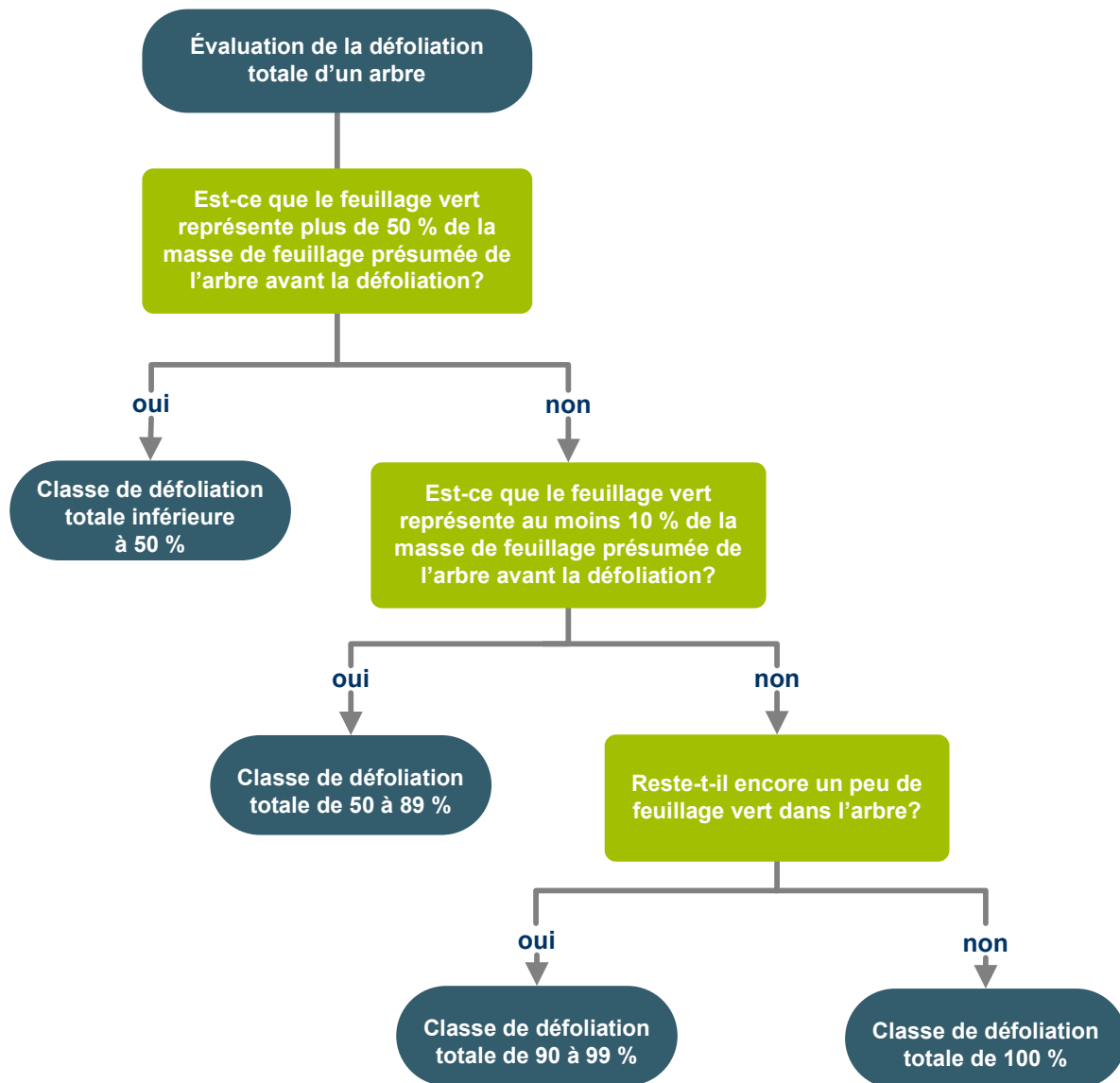
1. Inférieure à 50 %
2. De 50 à 89 %
3. De 90 à 99 %
4. 100 %



Au centre de la photo, six sapins qui représentent l'ensemble du gradient de défoliation dans un même peuplement : depuis l'arbre mort (à gauche) jusqu'à l'arbre défolié à moins de 50 % (à droite).

1. Il est à noter que cette méthode d'évaluation de la défoliation totale est utilisable pour les arbres prématures et matures, mais qu'elle ne s'applique pas aux semis et aux gaules.

La figure ci-dessous illustre comment s'y prendre pour établir la classe de défoliation d'un arbre. Les pages suivantes présentent des photos d'arbres et de branches illustrant chacune des classes de défoliation ainsi que les principales caractéristiques de celles-ci.



1. Défoliation totale inférieure à 50 %

Caractéristiques

- La masse de feuillage vert domine, même si le bout des branches est dénudé ou que les branches ont une apparence brunâtre ou grisâtre, résultat d'une défoliation qui s'est produite pendant quelques années (généralement trois ou moins).
- Le risque de mortalité de l'arbre à court terme est **faible**.





Branche de sapin défoliée à moins de 50 %

2. Défoliation totale de 50 à 89 %

Caractéristiques

- À première vue, l'arbre a une apparence plus ou moins brunâtre ou grisâtre. Le feuillage restant est habituellement au centre et dans le bas du houppier.
- L'arbre peut survivre à quelques années de défoliation ou atteindre le point de non-retour et mourir même si l'épidémie cesse. Cela dépendra de la vigueur et de la quantité résiduelle de feuillage.
- Le risque de mortalité de l'arbre est **moyen**.





3. Défoliation totale de 90 à 99 %

Caractéristiques

- À première vue, l'arbre a l'air mort. Il lui reste moins de 10 % de feuillage. La plupart des arbres de cette classe vont mourir même si l'épidémie cessait rapidement. Il est d'ailleurs possible que certains d'entre eux soient déjà morts. On peut le vérifier en soulevant légèrement l'écorce à quelques endroits autour du tronc.
- Le risque de mortalité de l'arbre est **élevé**. On considère ces arbres comme moribonds.



4. Défoliation totale de 100 %

Caractéristiques

- L'arbre est présumé **mort**, puisqu'il n'a plus de feuillage vert.
- La probabilité que l'arbre survive est quasi nulle même si l'épidémie cesse, particulièrement si l'arbre a une dimension commerciale.
- Comme pour la classe précédente, on peut s'assurer qu'il est mort en soulevant un peu d'écorce afin d'examiner la couleur du cambium.



Arbre défolié à 100 %



Le cambium de couleur orangée atteste que l'arbre est bel et bien mort.

Arbre mort depuis moins d'un an



Cambium orangé et présence d'une galerie d'insectes en surface

Arbre mort depuis plus de deux ans



L'écorce se soulève.



Le trou de sortie du longicorne adulte témoigne que la mort de l'arbre remonte à plus de deux ans. On peut aussi observer des sciures de bois à la base de l'arbre.

BIBLIOGRAPHIE

- ARCHAMBAULT, L., et autres (1990). « Influence du drainage et de la texture du dépôt sur la vulnérabilité du sapin baumier et de l'épinette blanche aux attaques de la tordeuse des bourgeons de l'épinette », *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 20, n° 6, p. 750-756.
- BASHAM, J. T. (1984). "Degradation and loss of wood fiber in spruce budworm killed timber and effects on utilization", *The Forestry Chronicle*, vol. 60, n° 1, p. 10-14.
- BASHAM, J. T. (1986). "Biological factors influencing stem deterioration rates and salvage planning in balsam fir killed after defoliation by spruce budworm", *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 16, n° 6, p. 1217-1229.
- BASHAM, J. T., et autres (1976). "Balsam fir death and deterioration in eastern Canada following girdling", *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 6, n° 3, p. 406-414.
- BASHAM, J. T., et R. M. BELYEA (1960). "Death and deterioration of balsam fir weakened by spruce budworm defoliation in Ontario, Part III, The deterioration of dead trees", *Forest Science*, vol. 6, p. 78-96.
- BASKERVILLE, G. L. (1983). "Balsam fir foliage regression are age dependent", *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 13, n° 6, p. 1248-1251.
- BASKERVILLE, G. L., et D. A. MACLEAN (1979). *Budworm-caused mortality and 20-year recovery in immature balsam fir stands*, Canadian Forestry Service, Maritimes Forest Research Centre, 23 p. (Inf. Report; M-X-102).
- BAUCE, É., et A. FUENTEALBA (2013). "Interactions between stand thinning, site quality and host tree species on spruce budworm biological performance and host tree resistance over a 6-year period after thinning", *Forests Ecology and Management*, vol. 304, p. 212-223.
- BERGERON, Y., et autres (1995). "Balsam fir mortality following the last spruce budworm outbreak in northwestern Quebec", *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 25, n° 8, p. 1375-1384.
- BLAIS, J. R. (1964). "Account of a recent spruce budworm outbreak in the Laurentide Park region of Quebec and measures for reducing damage in future outbreaks", *The Forestry Chronicle*, vol. 40, p. 313-323.
- BLAIS, J. R. (1965). "Spruce budworm outbreaks in the past three centuries in the Laurentides Park, Quebec", *Forest Science*, vol. 11, n° 2, p. 130-138.
- BLAIS, J. R. (1984). « Réflexions sur l'épidémiologie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* [Clem.]) suite à 40 années d'études », *Revue d'Entomologie du Québec*, vol. 29, n° 1, p. 27-34.

- BLAIS, J. R. (1985). "The ecology of the eastern spruce budworm: a review and discussion", dans SANDERS, C. J. , et autres, éditeurs, *Recent advances in spruce budworms research: Proceedings of the CANUSA spruce budworms research symposium, September 16-20, 1984, Bangor, Maine*, Ottawa, Canadian Forestry Service, p. 49-59.
- BLAIS, J. R., et L. ARCHAMBAULT (1982). *Vulnérabilité du sapin baumier aux attaques de la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec*, Sainte-Foy (Québec), Environnement Canada, Service canadien des forêts, Centre de recherches forestières des Laurentides, 21 p. (Rapport d'information; LAU-X-51F).
- BOUCHARD, M., et D. POTHIER (2010). "Spatiotemporal variability in tree and stand mortality caused by spruce budworm outbreaks in eastern Quebec", *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 40, n° 1, p. 86-94.
- BOULET, B. (2001). « Les enseignements de la dernière épidémie de tordeuses des bourgeons de l'épinette », dans SERVICE CANADIEN DES FORÊTS, *Tordeuse des bourgeons de l'épinette : l'appriivoiser dans nos stratégies d'aménagement, Actes du colloque tenu à Shawinigan les 27, 28 et 29 mars 2001*, p. 3-13, (Fo18-48/2001F).
- BOULET, B. (2003). *Les champignons des arbres de l'est de l'Amérique du Nord*, Sainte-Foy, Québec, Les Publications du Québec, 727 p.
- CENTRE D'ÉTUDE SUR LA FORÊT (2008). *Avis scientifique portant sur l'article 92.0.3.2 de la Loi sur les forêts*, 41 p.
- CHABOT, M., B. BOULET et L. MORNEAU (2013). « La tordeuse des bourgeons de l'épinette, *Choristoneura fumiferana* », dans MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES, *Le guide sylvicole du Québec, Tome 1, Les fondements biologiques de la sylviculture*, Québec, Les Publications du Québec, p. 400-413.
- CHABOT, M., et J.-F. ROY (1979). *Méthode d'évaluation de l'état de santé des peuplements attaqués par la tordeuse des bourgeons de l'épinette*, ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction de la conservation, 11 p. (Rapport interne; EP-79-17) [Non publié].
- COOKE, B. J. (2014). "Spruce budworm: a century of observation, conjecture, and insight-now what can we predict ?", dans *Tordeuse des bourgeons de l'épinette – Faire face à la nouvelle épidémie*, Québec 19-20 février 2014, Ressources naturelles Canada, ministère des Ressources naturelles, Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, p. 132-140.
- COOKE, B. J., V. G. NEALIS et J. RÉGNIÈRE (2007). "Insect defoliators as periodic disturbances in northern forest ecosystems", dans JOHNSON, E. A., et K. MIYANISHI, *Plant disturbance ecology: The process and the response*, Burlington, Maine, Elsevier, Academic Press, p. 487-525.
- DE GRANDPRÉ, L., et autres (2014). « Expansion nordique de la tordeuse des bourgeons de l'épinette et résilience de la forêt boréale », dans MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES DU QUÉBEC, RESSOURCES NATURELLES CANADA et ORDRE DES INGÉNIEURS FORESTIERS DU QUÉBEC, *Tordeuse des bourgeons de l'épinette – Faire face à la nouvelle épidémie*, Actes du colloque tenu à Québec les 19-20 février 2014, p. 34-38.

- DUPONT, A., L. BÉLANGER et J. BOUSQUET (1991). "Relationship between balsam fir vulnerability to spruce budworm and ecological site conditions of fir stands in central Quebec", *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 21, n° 12, p. 1752-1759.
- FETTES, J. J. (1950). *Investigations of sampling techniques for population studies of the spruce budworm on balsam fir in Ontario*, Sault-Sainte-Marie, Ontario, Forest Insect Laboratory, Service canadien des forêts, p. 163-401 (Annual Technical Report; 4).
- GAGNON, R., et M. CHABOT (1991). *Prévention des pertes de bois attribuables à la tordeuse des bourgeons de l'épinette*, gouvernement du Québec, ministère des Forêts, 52 p.
- GHENT, A. W., D. A. FRASER et J. B. THOMAS (1957). "Studies of regeneration in forest stands devastated by the spruce budworm", *Forest Science*, vol. 3, n° 2, p. 184-208.
- GRAY, D. R., et W. E. MACKINNON (2006). "Outbreak patterns of the spruce budworm and their impacts in Canada", *The Forestry Chronicle*, vol. 82, n° 4, p. 550-561.
- HAN, E. N., et É. BAUCE (1998). "Timing of diapause initiation, metabolic changes and overwintering survival of the spruce budworm, *Choristoneura fumiferana*", *Ecological Entomology*, vol. 23, n° 2, p. 160-167.
- HENNIGAR, C. R., et autres (2008). "Differences in spruce budworm defoliation among balsam fir and white, red and black spruce", *Forest Science*, vol. 54, n° 2, p. 158-166.
- LOGAN, J. A., J. RÉGNIÈRE et J. A. POWELL (2003). "Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics", *Frontiers in Ecology and Environment*, vol. 1, n° 3, p. 130-137.
- LOGAN, T., et autres (2011). *Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise*. Ouranos et ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 124 p.
- LORTIE, M. (1968). *Quelques défauts indicateurs de carie chez le sapin baumier*, Québec, Fonds de recherche forestière de l'Université Laval, 38 p. (Bulletin; 11).
- LYNCH, A. M., et J. A. WITTER (1985). "Relationships between balsam fir mortality caused by the spruce budworm and stand, site, and soil variables in Michigan's Upper Peninsula", *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 15, n° 1, p. 141-147.
- MACLEAN, D. A. (1980). "Vulnerability of fir-spruce stands during uncontrolled spruce budworm outbreaks: a review and discussion", *The Forestry Chronicle*, vol. 56, n° 5, p. 213-221.
- MACLEAN, D. A., et W. E. MACKINNON (1997). "Effects of stand and site characteristics on susceptibility and vulnerability of balsam fir and spruce to spruce budworm in New Brunswick", *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 27, n° 1, p. 1859-1871.
- MACLEAN, D. A., et D. P. OSTAFF (1989). "Patterns of balsam fir mortality caused by an uncontrolled spruce budworm outbreak", *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 19, n° 9, p. 1087-1095.
- MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS (2014a). *Relevés aériens des dommages causés par les insectes*, [En ligne]. [www.mrn.gouv.qc.ca/forets/fimaq/insectes/fimaq-insectes-portrait-relevés.jsp] (Consulté le 1^{er} juin 2014).

- MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS (2014b). *L'aménagement écosystémique dans un contexte d'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette – Guide de référence pour moduler les activités d'aménagement dans les forêts publiques*, Québec, gouvernement du Québec, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers et Direction de la protection des forêts, 127 p.
- MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS (2014c). *L'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette et mon boisé*, Québec, gouvernement du Québec, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers et Direction de la protection des forêts, 27 p.
- MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS (2015). *La tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec*, gouvernement du Québec, Direction de la protection des forêts, 2 p.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES (1994). *Une stratégie – Aménager pour mieux protéger les forêts*, Québec, gouvernement du Québec, Direction des programmes forestiers, 197 p.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES (2013a). *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2, Les concepts et l'application de la sylviculture*, ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier, Québec, Les Publications du Québec, 709 p.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES (2013b). *Norme de stratification écoforestière – Quatrième inventaire écoforestier du Québec méridional*, Direction des inventaires forestiers, 101 p.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES (2013c). *Le guide sylvicole du Québec, Tome 1, Les fondements biologiques de la sylviculture*, ouvrage collectif sous la supervision de B. Boulet et de M. Huot, Québec, Les Publications du Québec, 1011 p.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE (2009). *Le portrait de l'évolution de la forêt publique sous aménagement du Québec méridional des années 1970 aux années 2000*, Québec, gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction des inventaires forestiers et Direction de l'environnement et de la protection des forêts, 142 p.
- MORIN, H., Y. JARDON et R. GAGNON (2007). "Relationships between spruce budworm outbreaks and forest dynamics in eastern North America", dans JOHNSON, E. A., et K. MIYASHITA, *Plant disturbance ecology – The process and the response*, Elsevier, New York, p. 555-577.
- MORIN, H., et autres (2008). « Régime des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans l'Est de l'Amérique du Nord », dans GAUTHIER, S., et autres, *Aménagement écosystémique en forêt boréale*, Québec, Presses de l'Université du Québec, p. 167-192.
- NEALIS, V. G., et J. RÉGNIÈRE (2004). "Insect–host relationships influencing disturbance by the spruce budworm in a boreal mixedwood forest", *Canadian Journal of Forestry Research*, vol. 34, no 9, p. 1870-1882.
- PELLETIER, G., Y. DUMONT et M. BÉDARD (2007). *SIFORT, Système d'Information Forestière par*

Tesselle, Manuel de l'utilisateur, [En ligne], Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune. [www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/fimaq/usager.pdf].

RÉGNIERE, J. (2014). « Les fondements d'une stratégie d'intervention hâtive contre la tordeuse des bourgeons de l'épinette », dans MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES DU QUÉBEC, RESSOURCES NATURELLES CANADA et ORDRE DES INGÉNIEURS FORESTIERS DU QUÉBEC, *Tordeuse des bourgeons de l'épinette – Faire face à la nouvelle épidémie*, Actes du colloque tenu à Québec les 19-20 février 2014, p. 86-91.

RÉGNIERE, J., R. ST-AMANT et P. DUVAL (2012). "Predicting insect distributions under climate change from physiological responses: spruce budworm as an example", *Biological Invasions*, vol. 14, n° 8, p. 1571-1586.

SAUCIER, J.-P., et autres (2009). « Écologie forestière », dans ORDRE DES INGÉNIEURS FORESTIERS DU QUÉBEC, *Manuel de foresterie*, 2^e édition, Québec, Édition MultiMondes, p. 165-316.

STILLWELL, M. A., et D. J. KELLY (1964). "Fungous deterioration of balsam fir killed by spruce budworm in northwestern New Brunswick", *The Forestry Chronicle*, vol. 40, n° 4, p. 482-487.

THÉRIAULT, G. (2002). *Échelles d'évaluation aérienne des dommages causés aux forêts par les insectes, les maladies, les feux et autres perturbations naturelles*, Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la conservation des forêts, 9 p.

WALL, R. E. (1988). "Deterioration of severely defoliated balsam fir in relation to stand age, spacing, and foliar protection", *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 18, n° 5, p. 490-497.



Forêts, Faune
et Parcs

Québec

