

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉTUDE DE FACTEURS CONTRÔLANT LA FENÊTRE DE BRIS DANS LES
PESSIÈRES À ÉPINETTE NOIRE ; MIEUX COMPRENDRE LA DYNAMIQUE
DES PEUPELEMENTS FORESTIERS DE LA FORÊT BORÉALE EN VUE D'UN
MEILLEUR AMÉNAGEMENT FORESTIER.

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE
DE
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PAR
STELSA FORTIN

DÉCEMBRE 2019

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Cette maîtrise a été pour moi une expérience formidable. Elle a été remplie de défis qui ont été passionnants à relever. Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice de maîtrise Sylvie Gauthier. Merci Sylvie d'avoir toujours été présente et d'avoir bien su me guider pour que je réussisse ce projet. Vous avez toujours eu réponse à toutes mes questions et vos grandes connaissances m'ont permis d'avancer et d'en apprendre tellement sur nos forêts. Sans vous, ce projet n'aurait pas été la moitié de ce qu'il est.

Merci tout particulier à mon codirecteur Yves Bergeron. Merci d'avoir toujours répondu rapidement à toutes mes questions. Vos connaissances et votre expérience m'ont permis de grandir dans ce processus qu'est la maîtrise.

Je tiens aussi à remercier particulièrement Louis De Grandpré et Daniel Kneeshaw qui ont tous deux commenté la version préliminaire de ce mémoire. Grâce à eux, j'ai pu améliorer ce travail et pousser plus loin ma réflexion sur la dynamique de la forêt boréale.

Un très gros merci à Maryse Marchand. Merci de m'avoir aidé pour tout ce qui concerne l'analyse statistique et R. Sans ton aide, je ne sais pas si j'aurais pu y arriver. Ton aide a été très précieuse.

Merci à tout le monde au CFL pour votre aide à un moment ou à un autre au cours de cette maîtrise (ou encore pour m'inviter à aller prendre le café du matin). Merci à Dominique, Louis, Yan et David.

Merci à Pierre Grondin et Alain Leduc d'avoir répondu à mes questions. Votre aide a été très appréciée pour construire ma méthodologie. Merci aussi d'avoir révisé ma proposition de recherche. Grâce à vous, mon travail est de meilleure qualité.

Un autre merci à Claude Allain et aux employés du MFFP de la Côte-Nord pour l'accueil. Merci de m'avoir aidé à formuler mes hypothèses de travail. Plus particulièrement, merci à Benoît Gaudreau d'avoir pris du temps pour me montrer des peuplements forestiers sur mon territoire d'étude. Merci aussi à Mathieu Bouchard pour ses données de feux.

Aussi, je remercie le programme Mitacs en collaboration avec le MFFP et REMABEC pour le financement de ce projet. Sans ce programme, je n'aurais pas eu la chance de travailler sur ce projet d'étude.

Un gros merci à ma famille de m'avoir soutenu dans ce projet. Plus particulièrement, un merci à mes parents, Paul Fortin et Marthe Gadbois. Merci de m'avoir enduré parler de mes arbres même si ce n'était pas un sujet que vous trouviez très passionnant. Merci à mon papa de m'avoir conduit à Montréal (plus d'une fois) et à Sept-Îles. Désolé d'avoir fait monter le kilométrage de ton auto.

Merci aussi à mes grands-parents George et Béatrice qui pensent que je vais sauver le monde en étudiant les changements climatiques. Ce n'est pas exactement ça, mais presque.

Merci à ma grand-maman Colette. Même si tu n'es plus parmi nous je sais que peu importe où tu es en ce moment, tu te vantes, la tête haute, que ta petite-fille fait des « grosses » études.

Finalement, je veux rendre hommage à mon copain Loïc. Merci de m'avoir rejoint au Québec pour m'appuyer. Tu as été mon roc durant ce processus. J'ai été dure à endurer, surtout durant les derniers mois. Merci d'avoir supporté la Stelsa stressée. Tu t'es tellement bien occupé de moi durant ce projet pour s'assurer que je réussis bien. Sans toi j'y saurais arriver difficilement (qui m'aurait cuisiné de si bons petits plats pour me donner l'énergie de continuer ?). Merci à toi mon amour.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	ixx
LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	xv
RÉSUMÉ.....	xvii
1. INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1 État des connaissances.....	3
1.1.1. Dynamique de perturbations pour le domaine de la pessière à mousse.....	3
1.2.2 Dynamique de trouée, succession forestière et cohorte structurale.....	5
1.2.3 Définition de vieille forêt et fenêtre de bris.....	7
1.2.4 Facteur influençant les caractéristiques de la fenêtre de bris.....	8
1.3 Objectifs et structure du mémoire.....	11
2. MATÉRIEL ET MÉTHODE GÉNÉRALE.....	14
2.1 Territoires d'études.....	14
2.1.1 Objectif 1.....	14
2.1.2 Objectif 2.....	15
2.2 Calcul des indices de vieillissement et de recrutement.....	17
3. CHAPITRE I : ÉTUDE DE FACTEURS CONTRÔLANT LES CARACTÉRISTIQUES DE LA FENÊTRE DE BRIS DANS LES PESSIÈRES À ÉPINETTE NOIRE DE LA CÔTE-NORD.....	26
3.1 Introduction.....	26
3.2 Objectifs.....	27
3.3 Méthodologie.....	28
3.4 Analyse statistique.....	28
3.5 Résultats.....	32
3.5.1 Indice de vieillissement.....	32
3.5.2 Indice de recrutement.....	36
3.6 Discussion.....	43
3.6.1 Facteur influençant la fenêtre de bris.....	43
3.6.2 Vitesse de la fenêtre de bris.....	45

3.6.3 Application possible / Aménagement écosystémique.....	48
4. CHAPITRE II : ÉTUDE DE FACTEURS CONTRÔLANT LES CARACTÉRISTIQUES DE LA FENÊTRE DE BRIS DE LA PESSIÈRE À MOUSSE DU QUÉBEC ; UNE PERCEPTIVE RÉGIONALE.....	51
4.1 Introduction.....	51
4.2 Matériel et méthode.....	53
4.3 Regroupement des régions écologiques selon le climat	53
4.4 Analyses statistiques.....	54
4.5 Résultats.....	59
4.5.1 Indice de vieillissement.....	59
4.5.2 Modèle statistique : indice de vieillissement.....	60
4.5.3 Facteurs influençant l'indice de vieillissement.....	62
4.5.4 Indice de recrutement.....	66
4.5.5 Modèles statistiques : indice de recrutement.....	67
4.5.6 Facteur influençant l'indice de recrutement.....	68
4.5.7. Synthèse des résultats.....	70
4.6 Discussion.....	72
4.6.1 Effet du sapin.....	73
4.6.2 Effet du régime climatique et du cycle de feu.....	74
5. CONCLUSION GÉNÉRALE.....	77
6. MATÉRIEL SUPPLÉMENTAIRE.....	80
MS 1. Position géographique de nos placettes.....	80
MS 1.1 : Position géographique des 37 placettes à l'étude du chapitre 1.....	80
MS 1.2 : Position géographique des 113 placettes à l'étude du chapitre 2.....	80
MS 2. Évolution de la structure des peuplements forestiers au cours du temps	81
MS 3. Clé d'âge adapté.....	82
MS.4 Regroupement des régions écologiques selon le meilleur modèle statistique	83
7. BIBLIOGRAPHIE	86

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Représentation conceptuelle d'un cycle de feu de 100 ans.....	3
1.2 Larve de tordeuse des bourgeons de l'épinette.....	4
1.3 Représentation schématique de la dynamique de succession en forêt boréale et de ses caractéristiques.....	6
1.4 Schéma de la succession des espèces forestière au cours du temps et séquence de cohorte dominant dans le paysage.....	8
2.1 Unités d'aménagements 093051 et 093052 (Côte-Nord).....	15
2.2 Régions écologiques du Québec méridional pour le territoire de la pessière à mousse.....	17
2.3. Carte de l'historique des feux sur le territoire de la Côte-Nord et attribution de l'âge selon la clé d'âge.....	19
2.4 Positions relatives des arbres dans un peuplement fictif.....	21
3.1 Valeurs de l'indice de vieillissement selon le temps depuis feu pour chaque placette au premier et au dernier inventaire.....	33
3.2 Effets du temps depuis feu sur l'indice de vieillissement pour un pourcentage de sapin moyen.....	35
3.3 Effets du pourcentage de sapin et du temps depuis feu sur l'indice de vieillissement.....	36
3.4 Valeurs de l'indice de recrutement selon le temps depuis feu pour chaque placette au premier et au dernier inventaire.....	37
3.5 Effets du temps depuis feu sur l'indice de vieillissement pour un pourcentage de sapin et un IQS moyen.....	40
3.6 Effets du pourcentage de sapin sur l'indice de recrutement selon le temps depuis feu et pour un IQS moyen.....	41
3.7 Effets de l'IQS et de l'indice de recrutement selon le temps depuis feu et le pourcentage de sapin moyen.....	42
3.8 Valeurs attendues vs valeurs obtenues de l'indice de vieillissement selon le temps depuis feu.....	45
4.1 Schéma simplifié de la dynamique forestière de la pessière à mousse noire.....	52

4.2 Valeurs de l'indice de vieillissement selon le temps depuis feu final pour chaque placette au premier et au dernier inventaire.....	60
4.3 Effets du temps depuis feu et du pourcentage de sapin moyen par régions écologiques selon l'indice de vieillissement.....	63
4.4 Effets du pourcentage de sapin (1 ^{er} et dernier quartile régional) et du temps depuis feu sur l'indice de vieillissement.....	65
4.5 Valeurs de l'indice de recrutement selon le temps depuis feu par placette au premier et au dernier inventaire.....	66
4.6 Effet de la région écologique sur l'indice de recrutement.....	69
4.7 Caractéristiques de la fenêtre de bris selon les différentes régions écologiques.....	71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Régime climatique des différentes régions écologiques présentes sur le territoire de la pessière à mousse du Québec.....	16
3.1 Définition et explication des facteurs pouvant influencer la valeur de l'indice de vieillissement et de recrutement (a) et effets attendu sur l'indice de vieillissement et de recrutement (b).....	28
3.2 Liste des modèles statistiques candidats avec leurs explications biologiques des effets attendus sur la mortalité et le recrutement d'arbres dans un peuplement.....	31
3.3 Résultats des analyses d'AICc pour les différents modèles candidat pouvant le mieux expliqués l'indice de vieillissement.....	33
3.4 Résultat de la GLM du « meilleur » modèle : Indice de vieillissement ~ Temps entre inventaires + temps depuis feu final + Pourcentage de sapin.....	34
3.5 Résultat des analyses d'AICc pour les différents modèles candidat pouvant le mieux expliqués l'indice de recrutement.....	39
3.6 Résultat de la GLM pour le modèle suivant : Indice de recrutement ~ Temps entre inventaires + temps depuis feu + pourcentage de sapin + indice de qualité de station + censure.....	39
3.7 Début et fin de la fenêtre de bris selon le pourcentage de sapin et pour l'indice de recrutement et de vieillissement	47
3.8 Structure d'âge des peuplements forestiers de la pessière à mousse du Québec.....	48
4.1 Regroupement des régions écologiques de la pessière à mousse selon le climat.....	54
4.2 Définition et explication des facteurs pouvant influencer la valeur de l'indice de vieillissement et de recrutement (a) et effet attendu de ces facteurs sur l'indice de vieillissement et de recrutement.....	54
4.3 Liste de modèle statistique par hypothèse pouvant expliquer l'indice de vieillissement et l'indice de recrutement.....	57
4.4 Résultats d'analyse d'AICc des modèles candidats pouvant le mieux expliqué l'indice de vieillissement.....	61

4.5 Résultats des GLM pour le meilleur modèle statistique ; Indice de vieillissement = Temps entre inventaires + ((temps depuis feu final) *(pourcentage de sapin + région écologique)).....	61
4.6 Âge de début, de fin et durée de la fenêtre de bris selon le pourcentage de sapin moyen dans les placettes présentes sur le territoire des différentes régions écologiques.....	62
4.7 Résultats des analyses d'AICc pour les modèles candidats pouvant le mieux expliqué l'indice de recrutement.....	67
4.8 Résultat de la GLM pour le modèle suivant : Indice de vieillissement = Temps entre inventaires + ((temps depuis feu final) * (pourcentage de sapin + régions écologiques)).....	68
4.9 Synthèse des résultats obtenus ; Effet du pourcentage de sapin, de la température, de la saison de croissance et du régime de précipitation sur les caractéristiques de la fenêtre de bris.....	72

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AFÉ : Aménagement forestier écosystémique

DHP : Diamètre hauteur poitrine

IQS : Indice de qualité de station

MFFP : Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs

TBE : Tordeuse des bourgeons de l'épinette

TDF : Temps depuis feu

TEI : Temps entre inventaires

RÉSUMÉ

Les vieilles forêts ont une importance capitale pour la biodiversité, la résistance et la résilience de la forêt boréale québécoise. Comme celles-ci jouent un rôle important dans le maintien de la biodiversité et diminuent en abondance suite à l'aménagement forestier, il est intéressant d'étudier la période de transition entre un jeune et un vieux peuplement pour comprendre comment ces derniers se forment et à quel âge. Cette période de transition est nommée la fenêtre de bris. L'objectif principal de ce projet est d'observer les caractéristiques de la fenêtre de bris en forêt boréale. Le territoire de la pessière à mousse de la Côte-Nord a été étudié dans un premier temps. Celui-ci est caractérisé par un cycle de feu très long, des peuplements forestiers courts en hauteur, moins productifs que ceux présents à l'ouest et au centre du Québec, et par la présence d'un grand pourcentage de vieille forêt. L'objectif principal de cette section est d'observer les caractéristiques de la fenêtre de bris sur le territoire de la pessière à mousse de la Côte-Nord. Il s'agira notamment d'évaluer l'âge du début et de la fin de la fenêtre de bris et de déterminer l'influence de facteurs tels que la présence de sapin, la productivité et l'âge de la placette sur le phénomène de la fenêtre de bris. Les données des placettes permanentes du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) ont été utilisées pour observer la mortalité des arbres de la cohorte après feu et le recrutement dans la canopée au travers du temps. Sur la Côte-Nord, le temps depuis feu et le pourcentage de sapin dans la placette sont des facteurs influençant le processus de la fenêtre de bris. En moyenne, la fenêtre de bris est un processus qui s'étend sur environ 160 ans, commençant autour de 70 ans, et finissant autour de 225 ans selon le pourcentage de sapin dans la placette. Plus il y a de sapin dans la placette, plus celle-ci commence et finit tôt. L'objectif principal de la deuxième partie (section 4) est d'observer les caractéristiques de la fenêtre de bris de différentes régions écologiques du territoire de la pessière à mousse. En effet, le territoire de la pessière à mousse couvre un large territoire, donc, le climat varie de région en région. Aussi, l'effet de différent facteur sur la fenêtre de bris (climat, temps depuis feu, pourcentage de sapin et productivité de la placette) sera évalué. Le temps depuis feu et le pourcentage de sapin sont toujours des facteurs pouvant influencer la fenêtre de bris à cette échelle. De plus, les caractéristiques de la fenêtre de bris seront différentes selon le type de climat dicté par la région écologique dans laquelle la placette se situe. De manière générale, plus la température moyenne est élevée et la saison de croissance est longue, plus la fenêtre de bris commence tôt. De plus, le régime de perturbations naturelles influence la fenêtre de bris d'un point de vue régional. Mieux définir le moment et les mécanismes responsables de la fenêtre de bris permettra d'avoir un aménagement écosystémique mieux adapté aux vieux peuplements de ces régions du Québec boréal.

Mots clés : Vieille forêt, forêt boréale, fenêtre de bris, aménagement écosystémique, temps depuis feu

1. INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les feux de forêt sont la perturbation qui influence le plus le paysage de la forêt boréale (Zackrisson 1997, Bond et al. 2005 et Burton et al. 2008). Il est aujourd'hui accepté que le cycle de feu associé à cette forêt est variable et souple (Bergeron et Fenton 2012). En effet, celui-ci est très différent de région en région, certaines ayant des cycles de feu très court, de quelques dizaines d'années, tandis que d'autres peuvent avoir un cycle très long, de plusieurs centaines d'années (Bergeron et al. 2001, Bergeron et Gauthier 2016). Lorsque le cycle de feu est long, le paysage est plutôt modulé par des perturbations secondaires comme les chablis, les épidémies d'insectes et la dynamique des trouées (Harper et al. 2003), même si les feux y ont toujours cours. La forêt boréale du Québec a un paysage forestier très diversifié tant au point de vue de la structure forestière, de la composition en essence forestière et de la répartition de classe d'âge. Pour la structure d'âge, il y aura tendance à avoir un plus grand pourcentage de jeune forêt lorsque le cycle de feu est court et un plus grand pourcentage de vieille forêt lorsque le cycle de feu est long (Cumming et al. 1996, Bergeron et al. 1999). Ces vieilles forêts sont très importantes pour la diversité, la résistance et la résilience de la forêt (Gauthier et al. 2008, Spies and Duncan 2009, Carcaillet et al. 2010). Or, il peut être difficile de bien différencier un vieux peuplement d'un jeune, principalement quand celui-ci est en processus de transition entre ces deux stades. Il n'y a pas de consensus scientifique clair sur ce qu'est une vieille forêt ou encore à quel moment précis un peuplement devient âgé (Spies 2004, Barton et Keeton 2018). Selon les états de référence du ministère de la Faune, de la Flore et des Parcs (MFFP), un peuplement atteindrait son âge de vieillesse autour de 101 ans tandis que selon la littérature scientifique, cet âge tournerait plutôt autour de 150-200 ans, dépendamment des espèces présentes dans le peuplement (Kneeshaw et Burton 1998). Et de plus, selon Wirth et al (2002), il existe plusieurs définitions de ce que peut être un vieux peuplement. Dans le cadre de ce projet, une définition adaptée de « old-growth » de Wirth et al. (2002) sera utilisée pour expliquer ce qu'est une vieille forêt (voir état des

connaissances). Il est important de bien comprendre et de caractériser cette période de transition entre un jeune et un vieux peuplement forestier pour pouvoir mieux respecter les prémisses de l'aménagement forestier écosystémique (AFÉ). En effet, en 2010, le gouvernement du Québec a adopté une loi sur l'aménagement durable de la forêt qui veut que celle-ci soit aménagée de manière dite « écosystémique ». L'AFÉ est donc une « approche d'aménagement qui vise à maintenir des écosystèmes sains et résilients en misant sur une diminution des écarts entre les paysages naturels et ceux qui sont aménagés afin d'assurer, sur le long terme, le maintien et le bon fonctionnement des écosystèmes » (Gauthier et al. 2008). Pour suivre les prémisses de l'AFÉ, nous cherchons à effectuer un aménagement forestier qui se rapproche de ce qu'on le retrouve en nature, il est donc important de conserver un certain pourcentage de vieilles forêts qui équivaut au pourcentage qu'on retrouve naturellement en forêt. Maintenir une structure d'âge qui se rapproche de ce qu'on le retrouve dans la nature est un élément clé de l'AFÉ puisque cette distribution d'âge fournit un bon aperçu de la complexité structurale, de la biodiversité potentielle et du volume marchand d'une forêt (Fall et al. 2003). Ce « pourcentage » de vieille forêt est assez différent selon les régions du Québec. Par exemple, sur la Côte-Nord, il y a environ 1/3 de forêt qui sont considérées comme vieilles tandis qu'au nord-ouest de la pessière à mousse, il y en a environ deux fois moins (État de la forêt publique du Québec et de son aménagement durable–Bilan 2008-2013). Cela s'explique principalement par le fait que le cycle de feu est de seulement 150 ans au nord-ouest de la pessière à mousse en opposition à 270-500 ans sur la Côte-Nord, en moyenne (Boucher et al. 2011). Lorsque le cycle de feu est long, les arbres de la cohorte 1, ont le temps de mourir graduellement pour laisser place à une nouvelle cohorte (Olivier et Larson 1990). Pour les raisons mentionnées ci-haut, nous considérons qu'il manque de connaissance scientifique sur la période de transition d'un peuplement forestier entre le stade de jeunesse et de vieillesse. Une amélioration de ces connaissances pourrait permettre d'envisager un meilleur aménagement écosystémique, mieux adapté et se rapprochant plus de ce que l'on retrouve dans la nature.

1.1 État des connaissances

1.1.1. Dynamique de perturbations pour le domaine de la pessière à mousse

Le domaine bioclimatique de la pessière à mousse couvre environ 412 400 km² et succède à celui de la sapinière à bouleau blanc. Il s'étend approximativement jusqu'au 52e parallèle. Il est caractérisée par des peuplements monospécifiques d'épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.)B.S.P) parfois accompagnée de sapin baumier (*Abies*

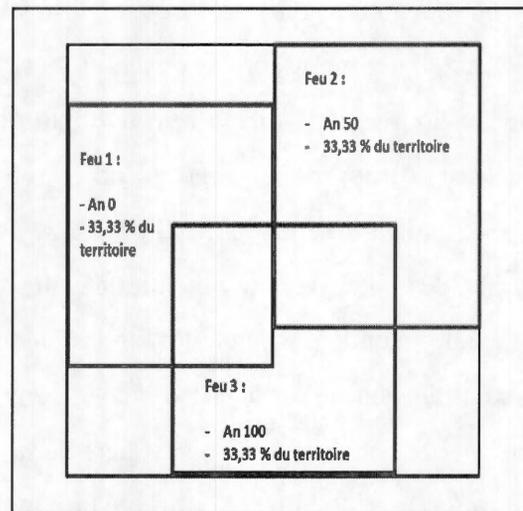


Figure 1.1 : Représentation conceptuelle d'un cycle de feu de 100 ans. Chaque carré de différente couleur représente un évènement de feu. Nous constatons qu'après 100 ans, l'équivalent de 100 % du territoire a été brûlé. Par contre, comme certains feux se superposent, certaines parties du territoire ont été brûlées plus d'une fois et certaines parties du territoire n'ont pas été touchées par le feu.

balsamea, (L.) Mill) ou d'autres espèces accompagnatrices (Couillard et al. 2016). Dû à un régime de feu et de précipitation différents, la pessière à mousse est séparée en deux « sous-régions » distinctes, la pessière à mousse de l'ouest et la pessière à mousse de l'est. Comme le feu a une grande influence sur la structure d'âge d'une forêt, il est important de bien comprendre les caractéristiques d'un cycle de feu. Par définition, un

cycle de feu correspond au temps requis pour brûler une superficie équivalente au territoire d'étude (Gauthier et al. 2001). Donc, par exemple, pour un cycle de feu de 100 ans, certains sites pourront brûler plus d'une fois tandis que d'autres pourront rester épargnés pendant une période correspondante (voir figure 1.1). Cela résulte en une forêt ayant des peuplements d'âge (Cumming et al. 1996, Bergeron et al. 1999) et de composition différente (Bergeron et al. 1999, Harper et al. 2003, Boucher et al. 2005, Côté et al. 2010). Les feux de forêt ont donc une influence importante sur la complexité du paysage (Kuuluvainen 2009), les procédés écologiques (Kuuluvainen et Laiho 2004) et pour la biodiversité (Franklin 1989, Bergeron et al. 2004, Drapeau et Imbeau 2004, Gauthier et al., 2008). Comme mentionné plus haut, le cycle de feu n'est pas de durée semblable selon le territoire d'étude. Pour la pessière à mousse de l'ouest, le cycle de feu est actuellement assez court et d'une durée d'environ 80-270 ans tandis que son homonyme de l'est à un cycle de feu qui oscille entre 270 et 500 ans (Boucher et al. 2011, MFFP 2013). De ce fait, il est compréhensible que l'on retrouve un pourcentage de vieille forêt plus important sur le territoire de la pessière à mousse de l'est que sur celui de l'ouest. De plus, particulièrement lorsque le cycle de feu est long, comme c'est le cas pour le territoire de la pessière à mousse de l'est, ce sont les perturbations secondaires qui dynamisent la forêt en absence de feu.

Les principales perturbations secondaires qui modulent la pessière à mousse sont les

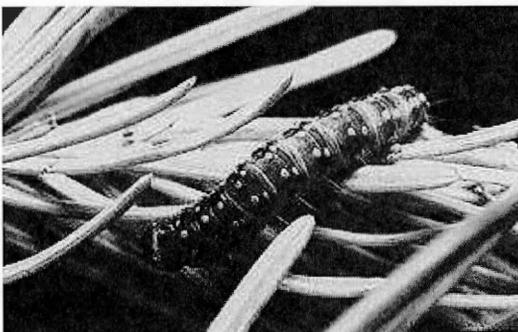


Figure 1.2 : Larve de tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE). Nom scientifique : *Choristoneura fumiferana*.

épidémies d'insecte, les chablis et la dynamique de trouée (Waldron et al., 2013 et Girard et al., 2014). L'insecte ravageur qui cause le plus de dégâts sur le territoire d'étude est la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) (*Choristoneura fumiferana*), qui s'attaque particulièrement aux sapins baumiers (Morin et al. 1988). Cet insecte indigène évolue de façon cyclique

sur un intervalle d'environ 30 ans. De plus, selon Maclean (1980), la maturité des peuplements est un facteur qui influence la vulnérabilité des arbres face aux ravageurs, les vieux peuplements sont plus à risque que les jeunes. Donc, préciser l'âge auquel un peuplement devient mature est un enjeu important. Cela est encore plus important dans le contexte actuel des changements climatiques, puisque les prédictions veulent que l'augmentation des températures (de l'ordre de ce qui est attendu dans nos régions) ait pour conséquences une plus grande probabilité d'observer des hausses explosives des ravageurs dû à l'amélioration du synchronisme hôte-insecte (en plus de la probabilité que ceux-ci échappent à leurs prédateurs naturels) (Logan, Régnière et Powell 2003, De Grandpré et al. 2018, Bouchard et Pothier 2010).

Une perturbation importante, principalement pour les forêts âgées, est le cas de chablis (Frelich 2000, Girard et al. 2013, Waldron et al. 2013). Par définition, un chablis est « un arbre ou un groupe d'arbres déracinés ou rompus dans le bas du tronc sous l'effet d'évènements climatiques ou de l'âge » (Glossaire Forestier MFFP, 2013). Selon Anyomi et al. 2016, les chablis seraient une perturbation récurrente qui serait influencée par les climats maritimes (comme c'est le cas de la partie la plus au sud-est du territoire d'étude), un nombre plus élevé de chablis étant dénombré dans ce genre de climat. Pour notre projet en particulier, il est important de bien déterminer l'âge de passage vers le stade de vieilles forêts puisque les chablis sont plus susceptibles d'arriver dans des peuplements âgés (Shorohova et al. 2011).

1.2.2 Dynamique de trouée, succession forestière et cohorte structurale

La dynamique des trouées affecte toutes les forêts en absence de feu (Bergeron et Dubuc 1989, McCarthy 2001). Par définition, une forêt ancienne est caractérisée par une structure inéquienne ou irrégulière issue de la lente dynamique de maturation qui implique la création de petites trouées (dynamique des trouées) dans le couvert forestier et la dominance des essences tolérantes à l'ombre (Glossaire forestier du MFFP, 2016).

Pour mieux comprendre comment se « forme » une vieille forêt, il est bien important de bien comprendre la dynamique de succession forestière que peut subir un peuplement forestier au cours de sa vie. Quelque temps après une perturbation, selon le type de végétation post-perturbation et les conditions biogéographiques, différents motifs de régénération peuvent être observés. Pour le territoire de la pessière à mousse, on observe généralement l'établissement d'épinette noire avec parfois des tolérants résineux comme le sapin baumier en sous-étage ou des épinettes noires dans le cas de peuplement monospécifique. La structure du peuplement est souvent de structure régulière dite équiennne. Ce groupe d'arbres s'installant directement après une perturbation est considéré comme des arbres de la cohorte 1 (voir figure 1.3 et Bergeron et al. 1993). Par la suite, en grande partie grâce à la dynamique de trouée causée par la sénescence des individus de la cohorte 1, les individus en sous-étage, qui correspondent aux arbres de la cohorte 2, peuvent commencer à prendre place dans la canopée. Le peuplement est alors à structure irrégulière/inéquiennne et est surtout composée d'espèces tolérantes à l'ombre, comme le sapin baumier. Plusieurs classes d'âge y sont représentées ainsi qu'une présence importante de bois mort. (Bergeron et Charron 1994, Baskerville 1999, Bergeron et al., 1999, Bouchard et al., 2007, Gauthier et al., 2008, 2010, Bélisle et al., 2011).

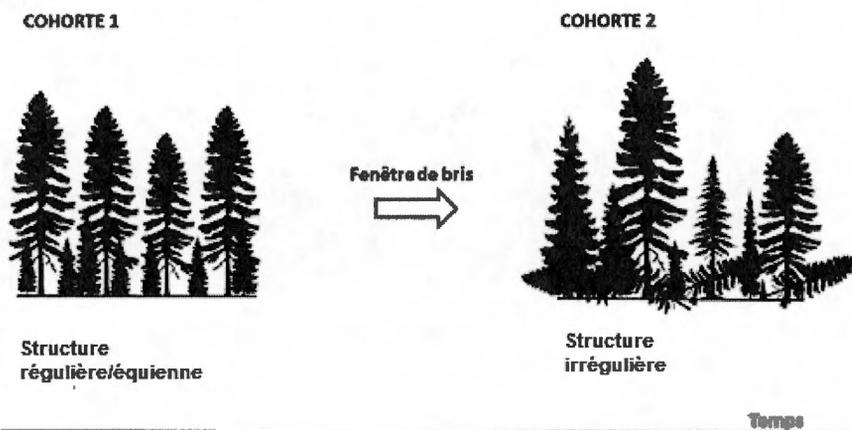


Figure 1.3 : Représentation schématique de la dynamique de succession en forêt boréale et de ses caractéristiques.

1.2.3 Définition de vieille forêt et fenêtre de bris

Selon les différents auteurs et pays, le stade de vieille forêt est atteint à différents moments dans la dynamique de successions des peuplements forestiers et il existe donc différentes définitions de ce qu'est une vieille forêt (Old-Growth Definition Task group 1986, Kneeshaw et Burton 1998, Spies 2004, Wirth et al. 2009). Il est difficile de donner une seule définition claire, simple et précise puisque la forêt âgée est considérée comme un système dynamique à interactions écologiques complexes, » (Wirth et al. 2009, Pesklevits et al. 2011). Il existe plusieurs manières d'identifier et de caractériser une forêt, par exemple par la structure, la composition, le processus de successions ou encore par les processus biogéochimiques. Or, nous allons ici nous intéresser plus particulièrement à la définition qui correspond le mieux à la pessière à mousse (définition adaptée de Wirth et al. 2002). La figure 1.4 illustre de manière conceptuelle la succession forestière qui se passe en forêt au cours du temps. Dans les premières années après une perturbation, les espèces pionnières (cohorte 1, C1) s'installent. Par la suite, les espèces présentes en sous-étage (cohorte 2, C2), commencent à s'imposer et à remplacer les individus de la première cohorte. De ce fait, lorsque les individus de la première cohorte commencent à mourir et qu'un petit pourcentage d'individu de la cohorte 2 commence à dominer nous disons que la fenêtre de bris commence. Cette fenêtre de bris va s'étendre jusqu'à ce que la majorité des individus de la cohorte 1 aient disparu, le stade de vieille forêt est alors atteint. Ce stade n'est pas définitif, mais plutôt dynamique, des changements de structures et de compositions pourraient être observés jusqu'à la prochaine perturbation. Pour la pessière à mousse, il arrive souvent que nous observions des peuplements monospécifiques d'épinette noire au cours du temps. Dans ce cas, nous n'observerons pas une succession d'espèce dans le temps, mais plutôt un changement de structure. Pour ce projet, le terme fenêtre de bris sera utilisé pour caractériser cette période de transition entre un jeune peuplement (cohorte 1) et un vieux peuplement (cohorte 2). En foresterie, le bris correspond à l'âge auquel

les arbres d'un peuplement forestier arrivent au terme de leur vie de manière plus ou moins synchrone. Ici, nous considérons que la fenêtre de bris commence lorsque les premiers arbres de la cohorte 1 meurent. Celle-ci se termine lorsque la grande majorité des arbres de la cohorte 1 sont morts pour laisser place à ceux de la cohorte 2.

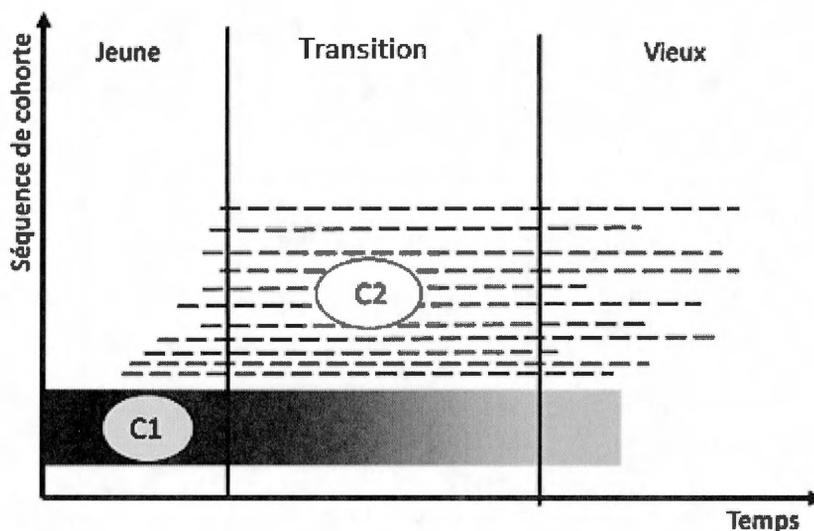


Figure 1.4 : Schéma de la succession des espèces forestières au cours du temps et séquence de cohorte dominante le paysage. (C1) = espèces pionnières, correspond aux individus de la cohorte 1. (C2) = correspond aux individus de la cohorte 2. Adapté de Wirth et al 2002.

1.2.4 Facteur influençant les caractéristiques de la fenêtre de bris

Plusieurs facteurs, peuvent influencer les caractéristiques et la vitesse à laquelle les individus de la cohorte 1 meurent (vitesse de la fenêtre). Premièrement, la composition en espèces des peuplements forestiers peut influencer la vitesse à laquelle la fenêtre de bris se déroule. En effet, nous croyons que selon les espèces présentes à la cohorte 1, la fenêtre de bris ne possédera pas les mêmes caractéristiques. Pour notre projet, nous observons des peuplements à dominance d'épinette noire. Nous pouvons donc croire que selon les espèces accompagnatrices présentes, l'âge de bris sera différent (ainsi que les caractéristiques de la fenêtre de bris). Par exemple, le sapin baumier a une longévité

qui tourne autour de 60-100 ans tandis que l'épinette noire à une longévité de 200 ans (table 2 – Kneeshaw et Gauthier 2003). Donc, nous pourrions croire qu'un peuplement d'épinettes accompagné de sapin aura une fenêtre de bris qui commence plus tôt qu'un peuplement monospécifique d'épinettes noires. Aussi, l'âge moyen où ces arbres commencent à mourir se situe un peu avant leur longévité maximale. Selon ces dernières informations, il est envisageable que la première cohorte puisse commencer à être remplacée autour de 100 ans et prendre de quelques années à quelques décennies avant qu'il y ait dominance des espèces de la cohorte 2.

La productivité est aussi un élément important à considérer. D'un point de vue écologique, la productivité correspond à la masse de substance vivante produite principalement grâce à l'absorption de CO₂ par les plantes et les arbres dans un temps donné et pour une surface terrestre donnée. Plusieurs critères doivent être présents pour pouvoir attribuer la mention « productive » à un territoire donné. Donc, pour qualifier un peuplement de productif, il faut que celui-ci possède un volume en bois minimal et que les arbres atteignent certaines dimensions dans un temps donné. Selon Ryan et al. (1997), plus un peuplement est productif, plus il va atteindre l'âge de bris rapidement. En moyenne, la pessière de l'ouest est plus productive que celle de l'est, on s'attend donc que le début de la fenêtre de bris commence un peu plus tard dans l'est. Dans le cadre de ce projet, la productivité de nos peuplements sera présentée sous forme d'indice de qualité de station (IQS). L'IQS est « une mesure communément utilisée en foresterie pour quantifier la productivité d'un site en mesurant la croissance en hauteur des arbres dominants en se référant à la hauteur à 50 ans et reste valable indépendant de la densité pour une très large gamme de densité » (Laflèche et al, 2013). Donc, théoriquement, plus un peuplement possède une mesure de IQS élevé, plus il sera productif et plus il commencera sa fenêtre de bris tôt. De plus, on peut s'attendre à ce que la vitesse de la fenêtre de bris soit plus élevée pour un IQS élevé (moins de temps pour passer à la cohorte 2).

Le climat, qui correspond au régime de précipitation et de température, est directement lié avec la productivité d'un site. Comme la productivité est garante de la croissance des arbres, nous pouvons croire que le climat a une influence sur les caractéristiques de la fenêtre de bris. Des températures chaudes et de bonnes précipitations aident les peuplements à avoir une bonne saison de croissance. Pour cette étude, nous utiliserons les régions écologiques du Québec méridional pour séparer la grande zone de la pessière à mousse en plus petites zones ayant des caractéristiques climatiques semblables. De manière simplifiée, nous pouvons croire que le climat est plus favorable à l'ouest qu'à l'est (gradient ouest-est) si l'on se fie aux données de précipitation, température et la longueur de la saison de croissance (voir description du territoire à la section 2). L'effet du climat est un aspect intéressant à regarder dans le contexte des changements climatiques, surtout que l'augmentation des activités anthropiques, plus particulièrement celles liées à la combustion fossile, pourrait entraîner des changements dans le flux net du carbone et par conséquent amener des changements en ce qui concerne la productivité des forêts (Norby J. et al., 2005) et l'occurrence des feux de forêt (Albert-Green et al. 2013, Boulanger et al. 2013, Flannigan et al. 2009, 2013, Le Goff et al. 2009, Jain et al. 2017, Westerling et al. 2006). Finalement, il est important de bien définir les caractéristiques de la fenêtre de bris dans le cadre de l'aménagement écosystémique.

L'aménagement forestier écosystémique (AFÉ), un concept étayé dans les années 90, est << une approche d'aménagement qui vise à maintenir des écosystèmes sains et résilients en misant sur une diminution des écarts entre les paysages naturels et ceux qui sont aménagés afin d'assurer, sur le long terme, le maintien et le bon fonctionnement des écosystèmes >> (Gauthier et al., 2008). Par conséquent, cela permettrait de conserver les bénéfices sociaux et économiques que l'on retire de la forêt (Gauthier et al. 2008). Ce concept se base sur la prémisse que les espèces sont adaptées depuis des milliers d'années aux perturbations naturelles et donc qu'elles se retrouveront dans un environnement auquel elles sont déjà adaptées (Franklin 1993 et

Gauthier et al. 1996). Il est donc à croire qu'un aménagement qui favorise le développement de peuplements et des paysages ayant une composition et une structure similaires à ceux soumis à un régime de perturbations naturelles seront favorables au maintien de la biodiversité et des fonctions écologiques essentielles. De ce fait, l'AFÉ propose de garder une certaine proportion de vieilles forêts sur le territoire en se basant sur ce que l'on retrouve dans la nature. Donc, en connaissant mieux les caractéristiques de la fenêtre de bris, nous pourrions mieux cibler cette proportion de vieilles forêts à conserver.

1.3 Objectifs et structure du mémoire

L'objectif principal de ce projet est de caractériser la fenêtre de bris pour des peuplements à dominance d'épinette se situant sur le territoire de la pessière à mousse du Québec, et ce, selon plusieurs caractéristiques comme le type écologique, le climat ou encore la productivité (mesurée grâce à l'indice de qualité de station) et pour deux territoires d'échelles différentes. Pour éviter les répétitions inutiles, nous présenterons, dans un premier temps, la méthodologie commune aux deux objectifs (section 2). La section 3 sera dévolue à répondre au premier objectif, tandis que la section 4 répondra au deuxième objectif. Dans chacune de ces deux sections, nous décrirons les méthodes propres à chacun des objectifs.

Objectif 1 : Dans un premier temps (section 3), nous chercherons à caractériser la fenêtre de bris de peuplements forestiers à majorité d'épinettes noires pour la pessière à mousses située au nord-ouest de Sept-Îles. Comme le cycle de feu est plus long sur la Côte-Nord et que la productivité est moindre (comparativement à la pessière de mousse de l'ouest, sur le territoire de l'Abitibi), nous pensons que la fenêtre de bris serait atteinte plus tardivement sur le territoire de la Côte-Nord de ce qui est accepté dans les états de référence du ministère (101 ans). De plus, nous voulons observer

l'influence de différents facteurs sur la fenêtre de bris. Nous voulons observer si l'IQS, le pourcentage de sapin par peuplement et le type écologique pourraient influencer la caractéristique de la fenêtre de bris.

Objectif 2 : Dans un deuxième temps (section 4), nous comparons les caractéristiques de la fenêtre de bris de peuplement à majorité d'épinettes pour les différentes régions écologiques de la pessière à mousses du Québec. Le territoire de la pessière couvrant un large territoire, les caractéristiques climatiques et le cycle de feu y sont différents de région en région. Nous voudrions vérifier si certaines régions écologiques ont des caractéristiques plus favorables à une bonne croissance, ce qui pourrait influencer le processus de la fenêtre de bris (âge de début, âge de fin, vitesse de la fenêtre de bris, etc.).

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE GÉNÉRALE

2.1 Territoires d'études

2.1.1 Objectif 1

Le territoire d'étude est situé dans la région administrative de la Côte-Nord. Les données ont été récoltées dans les unités d'aménagement 09-451 et 09-452 gérées par le MFFP de Sept-Îles. Ces unités se situent à l'est des régions écologiques 6K, 6L et 6I et à l'ouest de la région 6J (Saucier et Robitaille 1998). La forêt recouvrant ce territoire correspond à la pessière noire à mousse. Ce territoire est caractérisé par un climat subpolaire froid et humide, des précipitations relativement abondantes (1200 mm en moyenne), des températures moyennes peu élevées (- 2.5 degrés Celsius) et une courte saison de croissance (Saucier et Robitaille 1998, Rapport sur la limite nordique des forêts attribuables 2005, Cyr et al., 2009). Les dépôts de surface dominants sont surtout composés de dépôts de moins de 25 cm d'épaisseur et de till indifférencié ayant une épaisseur supérieure à 1 m. Le régime hydrique est majoritairement mésique et de nombreux lacs et rivières sont présents partout sur le territoire. L'ouest de l'UA 09-452 est bordé par le réservoir et la rivière Manicouagan. Au nord de Sept-Îles, une partie assez importante du territoire est composée de relief très accidenté formé de monts où les sols sont très minces avec des pentes supérieures à 40 %. De plus, de nombreux affleurements rocheux sont présents. À l'opposé, le nord du territoire possède moins d'éléments contraignants. Les peuplements y sont principalement monospécifiques et les paysages sont uniformes et dominés par l'épinette noire. Le sapin baumier y est bien représenté en tant qu'espèce accompagnatrice. Les sous-bois sont couverts de mousses hypnacées et de plantes arbustives éricacées.

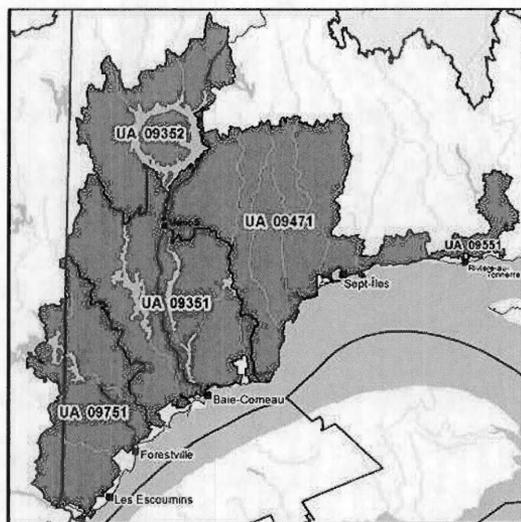


Figure 2.1 : Unités d’aménagements 09351 et 09352 de la Côte-Nord. (Source : Plans d’aménagement forestier intégré – Côte-Nord, ministère des Forêts, de la Faune et de Parc (consulté le 31 décembre 2018))

2.1.2 Objectif 2

Les peuplements à l’étude se situent sur le territoire de la pessière à mousse. Ce domaine forestier couvre 412 400 km² et s’étend environ jusqu’au 52^e parallèle, succédant à celui de la sapinière à bouleau blanc. Dû à un régime climatique différentiel (température moyenne, précipitations moyennes, saison de croissance, etc.), on sépare habituellement ce territoire en deux grands sous-domaines ; la pessière à mousse de l’ouest et celle de l’est. La pessière noire est caractérisée par des paysages assez uniformes. Effectivement, l’épinette noire y est dominante et on la retrouve souvent en peuplement monospécifique, mais elle peut parfois être accompagnée de certaines espèces. Pour la pessière à mousse de l’est, les peuplements y sont souvent accompagnés de sapin baumier tandis que les peuplements de la pessière de l’ouest sont souvent accompagnés de pin gris. Comme le cycle de feu est particulièrement long à l’est, il y a tendance à y avoir plus de forêts âgées qu’à l’ouest. Les dépôts dominants sont les dépôts glaciaires épais. À l’est, on retrouve plus de hautes collines et des

montagnes tandis que le territoire de l'ouest possède moins de relief. Les régions écologiques découpent le territoire forestier du Québec et plusieurs se retrouvent sur notre territoire d'étude. Ces régions se caractérisent par des différences de précipitation, de température et de saison de croissance, en autres. Le climat des différentes régions écologiques de la pessière à mousse est de type subpolaire subhumide continental, à l'exception des régions 6b, 6d et 6f qui ont un climat dit subpolaire continentale. Il est important de noter que certaines régions écologiques n'ont pas encore de guide de reconnaissance des types écologiques (MRN 2005). Ces régions sont les régions écologiques 6n, 6p, 6 q et 6r (voir tableau 2.1 et figure 2.2) :

Tableau 2.1 : Régime climatique des différentes régions écologiques présentes sur le territoire de la pessière à mousse du Québec selon leurs (MRN 2005 – guides de reconnaissance des types écologiques)

Région écologique	Précipitation	Température	Saison de croissance
	(mm)	(°c)	(jours)
6a – Plaine du lac Matagami	700 à 800	-2,5 à 0,0	140 à 160
6b – Plaine de la baie de Rupert	700	-2,5 à 0,0	140 à 150
6c – Plaine du lac Opémisca	800 à 1000	-2,5 à 0,0	140 à 160
6d – Coteaux du lac Assinica	700 à 800	-2,5 à 0,0	140 à 150
6e – Coteaux de la rivière Nestaocano	900 à 1100	-2,5 à 0,0	140 à 160
6f – Coteaux du lac Mistassini	700 à 900	-2,5 à 0,0	140 à 150
6g – Coteaux du lac Manouane	800 à 1000	-2,5 à 0,0	140
6h – Collines du lac Péribonka	900 à 1300	-2,5 à 1,0	140
6i – Hautes collines du réservoir aux Outardes	750 à 1200	-3,5 à 0,5	130 à 140

6j – Hautes collines du lac Cacaoui	700 à 1100	-3,5 à 0,5	110 à 140
6k – Coteaux de la rivière à la Croix	900 à 1100	-3 à -2	120 à 130
6l – Collines du lac Grand mesnil	800 à 950	-3 à -1	120 à 130

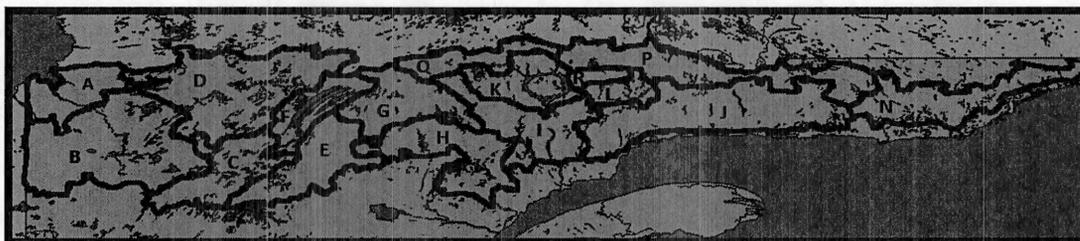


Figure 2.2 : Régions écologiques du Québec méridional. Le territoire de la pessière à mousse correspond à la région 6 (entouré en noir).

2.2 Calcul des indices de vieillissement et de recrutement

Les données utilisées pour cette étude proviennent des placettes échantillons permanentes (PEP) du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Depuis 1970, la direction des inventaires forestiers du MFFP tient périodiquement des inventaires sous forme de placettes-échantillons permanentes revisitées environ aux 10 ans. Les placettes sont réparties un peu partout sur le territoire québécois sous forme de « virée ». Par définition, « une virée de placette permanente est formée de placettes échantillons et désigne la ligne le long de laquelle on collecte des données depuis le point de départ jusqu'au point d'arrivée » (DIF 2016, Norme d'inventaire forestier). Les placettes permanentes sont donc des unités d'échantillonnages circulaires de 400 m² dans lesquels tous les arbres de plus de 90 mm de diamètre à hauteur poitrine (DHP) ont été répertoriés. Pour chaque arbre, plusieurs caractéristiques ont été observées telles que le diamètre, l'essence, la qualité du bois et l'état de l'arbre (vivant debout, vivant couché, mort debout ou mort couché). De plus, les arbres « études » (environ 9 arbres par placette) ont été sélectionnés pour faire l'objet d'une mesure de

la hauteur et de l'âge. Cinq de ces arbres études sont sélectionnés de manière systémique. Ils peuvent se retrouver dans n'importe quel étage de la canopée et sont choisis au hasard parmi des arbres ayant des critères précis. En résumé, ces arbres doivent avoir un diamètre de plus de 90 mm, être vivants sur pied et être entiers. Quatre arbres études sont aussi sélectionnés de manière représentative, selon leurs classes de diamètre. Plus précisément, parmi ces 4 arbres, 2 sont sélectionnés parmi les plus gros diamètres présents, 1 parmi la moyenne quadratique et 1 parmi les plus petites tiges. Au niveau de la placette, plusieurs caractéristiques générales ont été notées, comme le type écologique, le type de peuplement, le type de dépôt drainage et la classe de densité.

Pour une question d'homogénéité des données, certains filtres ont été appliqués pour sélectionner des placettes ayant des caractéristiques pertinentes à l'étude. En premier lieu, les peuplements à majorité d'épinettes noires (50 % et plus de tiges commerciales d'épinettes noires dans le peuplement) ont été sélectionnés. Ces peuplements peuvent être complètement monospécifiques (EE) ou avoir des essences accompagnatrices telles que le sapin (ES). Ensuite, les placettes possédant une classe de densité C (40 à 60 % de recouvrement) ont été sélectionnées (Norme des cartes écoforestières, MFFP 2009). Cette classe de densité est celle que l'on retrouve le plus sur les territoires d'études.

Pour les analyses subséquentes, il était essentiel d'attribuer à chacune des placettes deux caractéristiques qui n'ont pas été notées préalablement par le MFFP : l'âge (le temps depuis le dernier feu) et la productivité d'une placette. Les placettes ayant entre 40 et 150 ans au premier inventaire, tranche d'âge auquel, selon la littérature scientifique, la fenêtre de bris se déroulerait ont été sélectionnées. Il est possible d'attribuer un âge grâce à une clé développée par Dominic Cyr et Annie-Claude Bélisle. Avec cette méthode l'âge de la placette peut être censuré. Cela signifie simplement que le feu n'a pas pu être clairement daté, et que l'âge de la placette correspond plutôt à l'âge du plus vieil arbre trouvé, soit le temps minimum depuis le feu (voir Matériel

supplémentaire 3). Pour le territoire de la Côte-Nord, il est aussi possible d'attribuer l'âge d'une placette grâce à une carte qui répertorie les anciens feux pour ce territoire (Bouchard et al. 2007, voir figure 2.3). Cette carte a été construite grâce à plusieurs données d'archives du MFFP comme, par exemple, des vieilles photos aériennes et des cartes forestières. Par contre, les feux ayant eu lieu entre 1800 et 1900 sont difficilement détectables avec cette méthode, et seuls les feux de grande superficie pouvaient l'être avec une bonne précision. Alors grâce à cette carte, nous pouvons attribuer un âge à plusieurs placettes. Lorsqu'il n'y a pas de feux détectables, l'âge de la placette est attribué grâce à la clé d'âge mentionnée ci-haut.

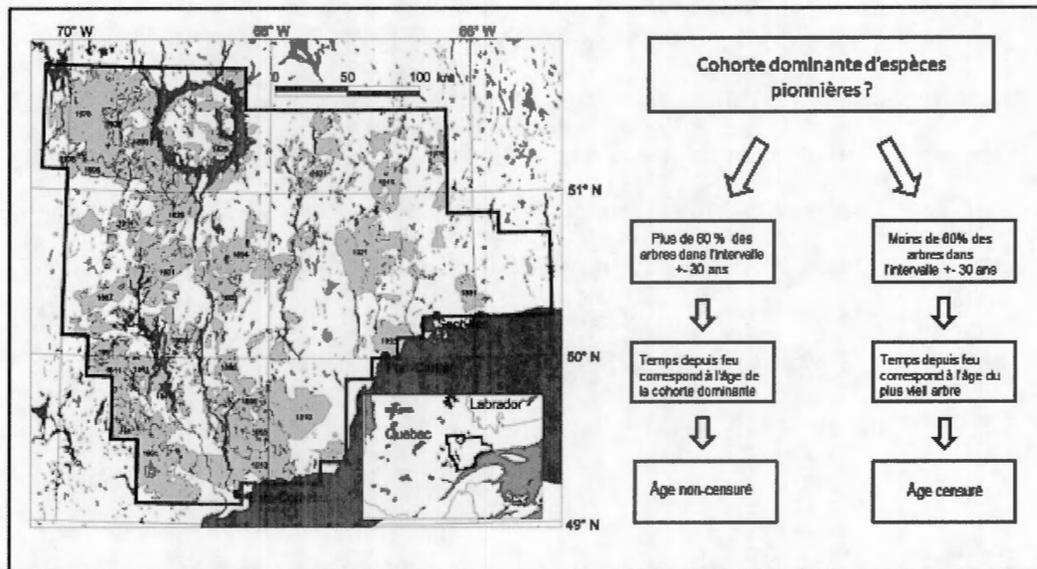


Figure 2.3 : À gauche, la carte de l'historique des feux sur le territoire de la Côte-Nord réalisé par Bouchard et al. (2007). Sur cette carte, seuls les feux de grandes superficies sont représentés. À droite, un résumé de la méthode d'attribution d'âge lorsqu'il n'y avait pas de feu détecté. (1) Âge non censuré : lorsque 60 % des arbres et plus d'une virée se retrouvent dans le même intervalle d'âge (+30ans en bas de 150 ans et +- 40 ans en haut de 150 ans), le temps depuis feu correspond à l'âge de la cohorte dominante. (2) Âge censuré : lorsqu'il y a moins de 60 % des arbres d'une virée qui se retrouve dans le même intervalle d'âge (+30ans en bas de 150 ans et +- 40 ans en haut de 150 ans), le temps depuis feu correspond à l'âge du plus vieil arbre de la virée.

Pour mesurer la productivité, les valeurs d'IQS potentielle (IQS station) ont été utilisées. Ces IQS « représentent la hauteur moyenne qu'un arbre dominant peut atteindre à 50 ans (âge évalué à 1 m de hauteur) sans oppression juvénile et sans effets importants de défoliation par les insectes » (Laflèche et al. 2013). Pour attribuer un IQS à chaque placette, nous avons utilisé les données des polygones forestiers des cartes écoforestières du Québec méridional, une base de données ouverte rendue disponible par le MFFP. Les valeurs d'IQS se retrouvent dans l'intervalle de valeur de 7 à 13 m à 50 ans.

Comme mentionné plus haut, la fenêtre de bris correspond aux laps de temps où les arbres de la cohorte 1 meurent graduellement pour laisser place à ceux de la cohorte 2. Ce sont donc les arbres de la cohorte 1 qui ont été identifiés dans nos placettes. Ces arbres dominant et codominant (2/3 supérieure de la hauteur des arbres) le peuplement forestier qu'ils soient morts ou vivants. Un état (mort ou vivant) a été attribué à toutes les tiges marchandes de chaque placette. Le MFFP note l'état des tiges sous forme de plusieurs codes chiffrés.

La hauteur de chaque arbre est nécessaire pour leur attribuer une position dans le peuplement. Par contre, seuls les arbres « études » ont une hauteur de mesurée. Ces arbres ont été utilisés pour construire des équations de hauteur selon le diamètre pour chaque essence d'arbre dans nos placettes. Pour ce faire, les arbres études ont été classés selon leur essence et leur type écologique (ex. : épinette noire selon RS22.). Nous avons pu créer des équations de la hauteur selon le diamètre. Les équations finales avaient la forme suivante : hauteur = Diamètre*x + intercepte (les relations entre la hauteur et le diamètre pour les arbres études sont significatives). Par la suite, une position basée sur la hauteur relative des arbres dans la canopée est attribuée à chaque individu de la première prise de données. Selon les normes des placettes permanentes du la DIF (source), un arbre est dominant-codominant (DC) lorsque sa cime se situe dans les 2/3 supérieur de la canopée, par rapport à l'arbre le plus grand.

Un arbre est intermédiaire (I) lorsque sa cime se retrouve dans l'intervalle $1/2$ à $2/3$ de la hauteur du peuplement. Un arbre est opprimé (O) s'il se situe dans l'espace plus bas que la moitié de la hauteur, toujours selon la hauteur du plus grand arbre (voir la figure 2.4). Pour les arbres dominant et codominant, la position attribuée à la prise de donnée 1 est attribuée aux prises de données subséquentes. Aussi, pour les prises de données 2, 3, 4, des gaules peuvent se retrouver maintenant dans la catégorie « arbres » (DHP plus grand que 90 mm). Ceux-ci auront la mention recrue (R) d'attribuée.

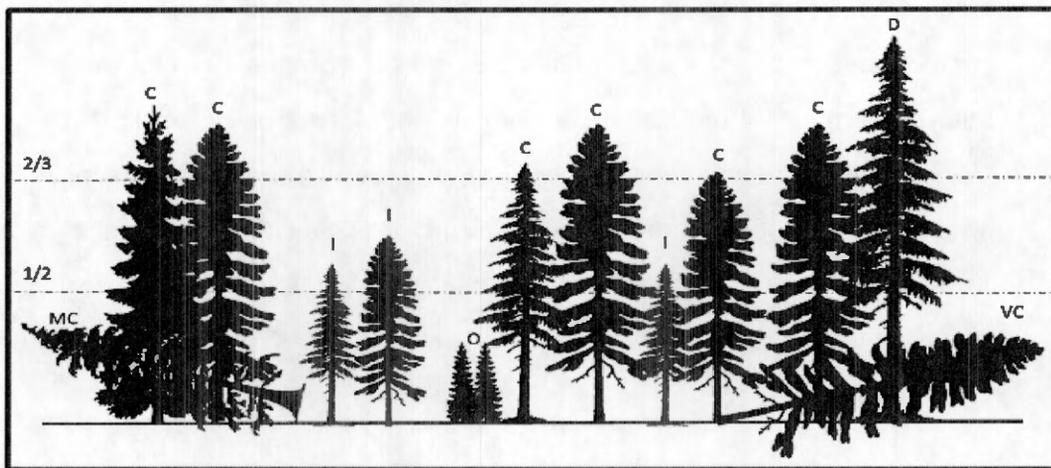


Figure 2.4 : Position relative des arbres dans un peuplement fictif. Un arbre est dominant (D) ou codominant (C) lorsqu'il se retrouve dans le $2/3$ supérieur de la hauteur des arbres d'un peuplement. Il est intermédiaire lorsqu'il se retrouve dans l'intervalle $1/2$ et $2/3$ de la hauteur. Il est opprimé quand il se retrouve dans le $1/2$ inférieur de la hauteur du peuplement. Un arbre tombé (couché) se voit attribuer une position selon la hauteur qu'il aurait s'il était toujours debout. Un état est aussi attribué aux arbres couchés selon s'ils sont vivant ou mort (V= vivant, M= mort).

Selon la dynamique de succession forestière, plusieurs années après un feu, les arbres de la cohorte 2 commencent à remplacer graduellement ceux de la cohorte 1. Comme certaines placettes ont des âges censurés, il n'est pas impossible que des arbres de la

cohorte 2 soient déjà présents dans l'étage des dominants-codominant au moment de la première mesure. Dans le but de réduire cette « cause » d'erreur (mauvaise attribution de la cohorte à chaque arbre), la structure forestière de chaque placette a été déterminée selon la méthode proposée par Boucher et al. (2003). Pour ce faire, nous avons réuni les DHP de chaque placette en classe de 2 cm, et ce pour tous les arbres plus grands que 10 cm. Plusieurs indices ont été calculés à partir de ces données comme l'indice de diversité de Shannon-Wiener et le coefficient d'asymétrie et de variation du peuplement. À partir de ces indices, la structure du peuplement de la placette peut être déterminée. Pour faciliter les analyses, les différents « types » de structure ont été réunis en deux grands groupes, soit les peuplements irréguliers, dans lesquels nous avons inclus les peuplements inéquien et en J inversé (selon la classification de Boucher et al. 2003) et les peuplements réguliers. De manière générale, un peuplement post-perturbation aura tendance à avoir une structure forestière régulière, ce qui signifie que la grande majorité des arbres de la cohorte 1 se retrouveront dans le même intervalle de hauteur (2/3 supérieur de la hauteur du peuplement). La structure forestière tend à devenir irrégulière avec le temps. En ne sélectionnant que les placettes possédant une structure régulière à la première mesure, la définition que nous avons de cohorte 1 (arbres se trouvant dans le 2/3 supérieur de la canopée) sera plus juste et précise.

À ce stade, nous pouvons calculer un indice de vieillissement par placette. Cet indice observe la mortalité des arbres de la cohorte 1 au travers du temps (entre le premier et le dernier inventaire) :

Indice de vieillissement

$= \frac{NBA1_{mort} (Dernière\ prise\ de\ données)}{NB\ A1_{vivant} (Première\ prise\ de\ données)}$

A1 = Arbres de la cohorte 1

NB = Nombre arbre

Cet indice varie de 0 à 1. Donc, logiquement, lorsque la valeur du ratio est égale à 1, cela signifie que 100 % des arbres de la cohorte 1 sont morts. Le début de la fenêtre de bris correspond au moment où 20 % des arbres de la cohorte 1 sont morts (indice = 0,20). De plus, elle se termine lorsqu'un minimum de 80 % des arbres de la cohorte 1 sont morts. Il est intéressant de noter que nous avons initialement calculé nos indices en termes de surface terrière plutôt qu'en termes de nombre d'arbres. Pour des raisons statistiques, il est plus simple d'avoir un indice de vieillissement en termes de nombre d'arbres plutôt qu'en termes de surface terrière. Les deux méthodes donnent des résultats semblables. Il arrive parfois qu'un arbre soit oublié durant un inventaire et soit mesuré qu'à l'inventaire suivant. Ces arbres possèdent les codes « 30,32 ou 34 », et sont incluse aux calculs des deux indices

Par la suite, un deuxième indice permettant d'observer le recrutement d'arbre dans l'étage dominant-codominant de la canopée a été calculé. Pour ce faire, une hauteur relative a été attribué pour chaque arbre donnée dans une placette, et ce pour chaque inventaire. De ce fait, nous pouvons trouver le nombre de « nouveaux » arbres dominant-codominant dans nos placettes au cours du temps. C'est-à-dire tout arbre n'étant pas dominant-codominant au premier inventaire, incluant les recrues, mais le devenant dans les inventaires subséquents. L'indice de recrutement est alors calculé comme suit :

Indice de recrutement =

$$\frac{\text{Nb de nouveaux dominant – codominant au dernier inventaire}}{\text{Nb d'arbre ayant le potentiel de devenir dominant – codominant au premier inventaire}}$$

Le dénominateur correspond au nombre d'arbres potentiels pouvant devenir dominant-codominant au travers du temps (excluant les recrues). En d'autres mots, le

dénominateur correspond aux arbres commerciaux de la placette, qui n'étaient pas dominant ou codominant au premier inventaire. En effet, nous considérons que lorsqu'un arbre mesure plus de 90 mm, il a le potentiel de devenir dominant-codominant au fil de temps, du moment qu'il peut profiter d'une trouée pour percer dans la canopée.

3. CHAPITRE I : ÉTUDE DE FACTEURS CONTRÔLANT LES CARACTÉRISTIQUES DE :LA FENÊTRE DE BRIS DANS LES PESSIÈRES À ÉPINETTE NOIRE DE LA CÔTE-NORD

3.1 Introduction

La forêt boréale couvre environ 75 % du territoire forestier canadien, soit ~307 millions d'hectares (Ressources naturelles Canada, 2018). Elle fournit des services écologiques essentiels et critiques tant au point de vue local, régional et global (Gauthier et al. 2010). Les vieilles forêts ont une plus grande diversité de structures et de traits fonctionnels que les jeunes forêts, cela se traduit par la présence d'une grande biodiversité. D'un point de vue de l'aménagement forestier, le maintien de l'intégrité écologique des forêts aménagées est un aspect important qui passe par la conservation des peuplements matures et âgés (Essen et al.1997). Par contre, le taux actuel de la récolte forestière et des feux forêts étant assez élevés, la proportion de vieilles forêts pourrait descendre à un niveau très bas rarement observé dans le paysage naturel (Bergeron et al. 2016). Pour ces raisons, il est important de mieux comprendre comment celles-ci se forment. Le cycle de feu a un impact direct sur la quantité de vieilles forêts d'un territoire (Cumming et al.1996). La Côte-Nord a un cycle de feu d'environ 500 ans, environ 1/3 de ses forêts sont considérées vieilles (État de la forêt publique du Québec et de son aménagement durable– Bilan 2008-2013)). Selon Kneeshaw et Gauthier (2003), un peuplement forestier commence son stade de vieillissement lorsque la mortalité des arbres de la cohorte initiée après une perturbation majeure (cohorte 1) atteint un certain seuil. Cette section se concentre sur la période de transition entre un jeune et un vieux peuplement qui s'opère sur une période que nous nommons la fenêtre de bris. Notre définition de la fenêtre de bris est la suivante : étendue d'âge auquel les arbres de la cohorte 1 meurent graduellement pour laisser place aux arbres de la cohorte 2 dans la canopée. Plusieurs facteurs peuvent influencer

les caractéristiques de la fenêtre de bris (début, fin, durée). Premièrement, le temps depuis feu influence de manière importante la mortalité dans la placette. En effet, après un feu intense, il y a établissement d'une première cohorte d'arbres (cohorte 1). Après plusieurs années, ces arbres commenceront à mourir et à être remplacés par d'autres, initiant ainsi la fenêtre de bris du peuplement (Bergeron et al.1999). Donc, plus le temps depuis feu est élevé, plus il y aura de mortalité dans la placette (selon la tranche d'âge choisie). Le pourcentage de sapin dans une placette peut influencer l'âge de début et de fin de la fenêtre de bris pour plusieurs raisons. Comme le sapin a une espérance de vie plus courte que l'épinette noire, il aura tendance à être « remplacé » plus rapidement dans la canopée que l'épinette noire (MFFP, 2018). Finalement, le pourcentage de sapin est considéré comme une mesure de productivité. Donc, plus une placette contient du sapin, plus elle est productive et plus les arbres ont tendance à croître rapidement et, par le fait même, mourir plus rapidement. L'IQS est également une mesure de productivité qui est estimée. Plus une placette est productive, plus la fenêtre de bris devrait commencer et finir tôt. Plusieurs études se concentrent sur les changements structurels qu'un peuplement subit durant sa période de transition entre la dominance de la cohorte 1 ou de la cohorte 2, nous avons également estimé que cette caractéristique pourrait refléter la fenêtre de bris. Améliorer les connaissances scientifiques sur la fenêtre de bris pourrait permettre un meilleur aménagement écosystémique du territoire de la pessière à mousse. En effet, il est important de bien comprendre comment et quand une vieille forêt se forme pour mieux protéger ces types de peuplements.

3.2 Objectifs

L'objectif principal de cette section est d'observer les caractéristiques de la fenêtre de bris sur le territoire de la pessière à mousse de la Côte-Nord. Ce territoire, reconnu pour son cycle de feu long et son grand pourcentage de vieilles forêts, se démarque par des peuplements courts en hauteur et à développement plus lent que ceux présents sur la

peSSIÈre à mousse de l'ouest et du centre du Québec. En deuxième lieu, nous voulons identifier et observer les facteurs pouvant influencer les caractéristiques de la fenêtre de bris. Pour ce chapitre, nous évaluerons l'effet du temps depuis feu, du pourcentage de sapin dans la placette et de l'indice de qualité de station. Nous observerons aussi le recrutement dans la canopée au moment du processus de fenêtre de bris. Le travail sera fait à partir de placettes permanentes qui sont remesurées à différents temps. Pour cela nous tiendrons également compte du temps entre les deux mesures.

3.3 Méthodologie

Voir la section 2 pour la méthodologie générale qui permet de calculer les deux indices.

3.4 Analyse statistique

Parmi les placettes du territoire, 37 correspondaient aux critères recherchés (majorité d'épinettes noires, classe de densité C et ayant entre 50-150 ans au premier inventaire) (pour la position géographique, voir Matériel supplémentaire 1). Les facteurs qui peuvent influencer l'indice de vieillissement ainsi que l'indice de recrutement sont présentés dans le tableau 3.1 :

Tableau 3.1 : Définition des facteurs pouvant influencer la valeur de l'indice de vieillissement et de recrutement (a) et effets attendus sur l'indice de vieillissement et de recrutement (b)

(a)

Facteurs	Définition	Étendue des données	Unité de mesure
Temps depuis le dernier feu	Âge de la placette au dernier inventaire. Corresponds au temps passé depuis le dernier feu	81 à 170 ans	Temps (années)

Censure	L'âge de la placette est censuré lorsque qu'on ne connaît pas exactement le temps depuis le dernier feu.	0 : non censuré 1 : censuré	
IQS	Se définit par la hauteur moyenne des arbres dominants d'un peuplement selon un âge de référence, habituellement 50 ans. Mesure de productivité.	8,5 à 13	Hauteur moyenne des arbres à 50 ans.
Pourcentage de sapin au premier inventaire	Pourcentage du nombre de tiges de sapin baumier dans une placette	0 à 50	%

(b)

Facteur	Effet attendu sur l'indice de vieillissement	Effet attendu sur l'indice de recrutement
Temps depuis le dernier feu	Plus le temps depuis feu final est élevé, plus la mortalité sera élevée puisque le processus de la fenêtre de bris sera bien entamé.	Plus une placette à un temps depuis feu final élevé, moins il y aura de recrutement dans la placette.
Censure	Les placettes censurées pourraient plutôt être des placettes dont le processus de succession est déjà bien entamé.	Les placettes dont l'âge est censuré pourraient plutôt être des placettes dont le processus de succession est déjà bien entamé.
IQS	Plus une placette est productive (IQS élevé), plus le remplacement de la cohorte 1 se fera rapidement. La mortalité commencera plus tôt dans le temps	Plus une placette est productive (IQS élevé), plus le remplacement de la cohorte 1 se fera rapidement. Le recrutement commencera plus tôt dans le temps
Pourcentage de sapin au premier inventaire	Plus il y a de sapin dans une placette, plus le ratio serait élevé. Effectivement, le sapin est une espèce de mi- succession et a une espérance de vie moins élevée que l'épinette noire.	Plus il y a de sapin dans une placette, plus il y aura tendance à avoir de recrutement dans la placette. Le sapin a une espérance de vie moins élevée que l'épinette noire (mortalité plus jeune = plus de recrutement)

Dans le but de mieux comprendre quels facteurs peuvent influencer le phénomène de la fenêtre de bris (donc l'indice de vieillissement et l'indice de recrutement), plusieurs modèles de forme logistique basés sur diverses hypothèses biologiques ont été formulés (tableau 3.2). Il est important de mentionner que le temps entre inventaires est inclus dans chaque modèle du tableau 3.2. En effet, celui-ci n'a pas d'effet biologique sur le phénomène de la fenêtre de bris, mais comme le temps entre le premier et le dernier inventaire n'est pas le même pour toutes les placettes, il influence tout de même les résultats (le temps entre deux inventaires varie de 8 à 40 ans). De plus il a été choisi de prendre en compte cette variable plutôt que d'inclure dans les modèles le TDF initial et le TDF final, car l'interprétation des paramètres des modèles est plus simple de cette manière. Chaque modèle testé correspond à une régression logistique de type GLM (modèle linéaire généralisé) à distribution binomiale. On cherche alors à expliquer une variable réponse Y (indice de vieillissement ou indice de recrutement) par une ou plusieurs variables explicatives X (présenté au tableau 3.1). La variable réponse et les variables explicatives sont liées par une relation (lien) de type logit. Pour une GLM à distribution binomiale, les indices de vieillissement et de recrutement sont représentés sous forme de nombre d'évènements/ nombre d'essais. Par exemple, la forme de l'équation contenant tous les facteurs à l'étude pour l'indice de vieillissement serait la suivante :

$$\frac{\text{Nb d'arbres morts (C1)}}{\text{Nb d'arbres vivants (C1)}} = \frac{1}{1 + \exp(\text{TEI} * X1 - \text{TDF} * X2 - \% \text{SAPIN} * X3 - \text{IQS} * X4 - \text{Censure} * X5)}$$

Nb : Nombre C1 : Cohorte 1 TEI : temps entre inventaires TDF : Temps depuis feu final IQS : Indice de qualité de station

Tableau 3.2 : Liste des modèles statistiques candidats avec leurs explications biologiques des effets attendus sur la mortalité et le recrutement d'arbres dans un peuplement (fenêtre de bris). Le temps entre inventaires est inclus dans tous nos modèles.

Modèles	Hypothèses
TDF	Les évènements de mortalité sont influencés par les facteurs temporels seulement. Plus le temps depuis feu final est long, plus il y a de mortalité dans la placette. De plus, les évènements de recrutement sont associés aux jeunes placettes (temps depuis feu moins élevé).
TDF + censure	Les évènements de mortalité et de recrutement sont influencés par les facteurs temporels (voir ci-haut). La censure influence aussi les indices de vieillissement et de recrutement, car certaines placettes n'ont pas d'âge de déterminé précisément.
TDF + IQS	Les évènements de mortalité et de recrutement sont influencés par les facteurs temporels et la productivité (IQS étant une mesure de productivité estimé)
TDF + sapin	Les évènements de mortalité et de recrutement sont influencés par les facteurs temporels et la productivité (le sapin étant un indice de productivité et aussi une espèce moins longévive que l'épinette noire)
TDF + IQS + censure	Les évènements de mortalité et de recrutement sont influencés par les facteurs temporels et la productivité (IQS). La censure a aussi un effet sur les indices comme certaines placettes n'ont pas d'âge précisément déterminé.
TDF +sapin + censure	Les évènements de mortalité et de recrutement sont influencés par les facteurs temporels et la productivité (% de sapin). La censure a aussi un effet sur les indices comme certaines placettes n'ont pas d'âge précisément déterminé.
TDF + IQS + sapin + censure	Les évènements de mortalité et de recrutement sont influencés par tous les facteurs. L'IQS et le sapin étant deux mesures d'IQS différentes, ils ont chacune un effet sur l'indice de vieillissement et de recrutement. Les caractéristiques temporelles influencent les deux indices. En plus de la censure (pour les raisons citées ci-haut)

sapin = Pourcentage de sapin au premier inventaire

Afin de comparer ces hypothèses biologiques, et ce pour chacun des deux indices, nous avons utilisé le package « AICcmodavg » (Mazerolle 2017, logiciel R). En calculant des valeurs AIC (Akaike's information criterion), ceci a permis de « choisir » le meilleur modèle pour la suite des analyses. Comme l'échantillon est réduit (37

placettes), la valeur AIC corrigée pour les petits échantillons (AICc) a été utilisée. Les modèles ayant les valeurs AICc les plus basses sont les modèles à privilégier. Il est important de mentionner que des modèles avec interaction ont été testés. Aucun de ceux-ci ne s'est révélé être significatif possiblement dû au faible échantillon. Le meilleur modèle a été sélectionné, puis utilisé pour observer graphiquement l'effet des différents facteurs sur les indices de vieillissement et de recrutement. Pour les « meilleurs » modèles, ceux-ci ont été vérifiés pour s'assurer qu'ils sont bien ajustés à nos données (valeurs extrêmes, effet de levier, multicollinéarité ($vif < 2$) distance de cook et pouvoir prédictif du modèle).

3.5 Résultats

3.5.1 Indice de vieillissement

En premier lieu, l'évolution de l'indice de vieillissement au travers du temps pour chacune de nos 37 placettes a été observé (figure 3.1). Au premier inventaire, la plupart des placettes ont un indice de valeur 0 ou très près. En effet, à la première prise de donnée, il peut être difficile d'identifier la mortalité des arbres la cohorte 1 qui aurait possiblement déjà eu lieu. Effectivement, selon les normes d'échantillonnage des placettes permanentes du ministère, un arbre mort, dont l'état n'est pas trop décomposé, peut avoir sa hauteur de mesure. De ce fait, on peut en déduire sa position lorsqu'il était vivant et donc s'il appartenait à la cohorte 1. Or, lorsqu'un arbre est mort et en état de décomposition avancé, sa hauteur ne peut être mesurée et on ne peut pas déduire s'il était de la cohorte 1 ou de la cohorte 2. Il y a une tendance à l'augmentation de la valeur de l'indice de vieillissement avec le temps depuis feu. La valeur d'indice de vieillissement la plus haute observée est de 0,45 à 155 ans (45 % de mortalité).

Le modèle possédant la meilleure valeur d'AICc est le suivant : Indice de vieillissement = Temps entre inventaires + temps depuis feu + % de sapin (tableau 3.3). Par contre, il

n'y a pas une différence de valeur très élevée entre nos modèles (Delta AICc). En effet, le deuxième modèle à une différence d'AICc de seulement 1,65. En revanche, comme ce deuxième modèle est en quelque sorte inclus dans le premier (le temps entre inventaires et le temps depuis feu final est inclus aussi dans le premier modèle), nous avons décidé de garder le premier modèle pour illustrer nos résultats des sections subséquentes.

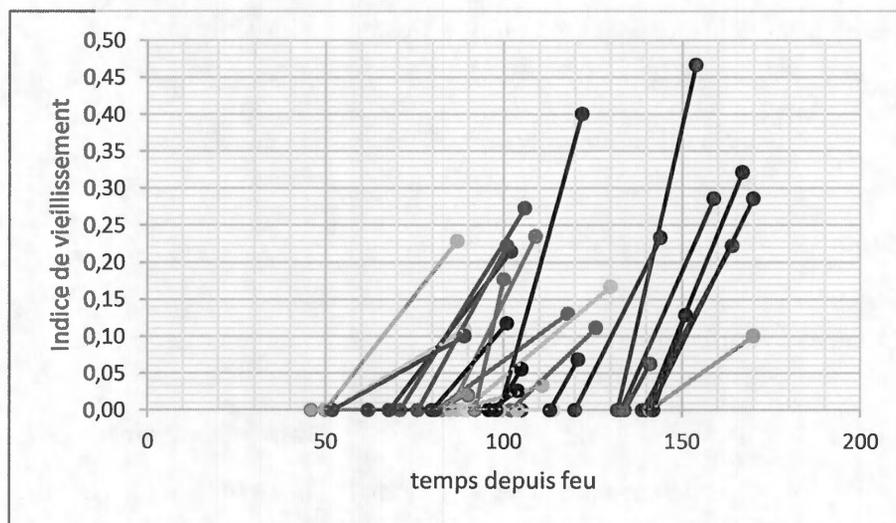


Figure 3.1 : Graphique de la valeur de l'indice de vieillissement selon le temps depuis feu pour chaque placette au premier et au dernier inventaire. (n=37)

Tableau 3.3 : Résultats des analyses d'AICc pour les modèles candidats pouvant le mieux expliqué l'indice de vieillissement. Le temps entre inventaires est inclus dans chaque modèles/hypothèses.

Modèles /hypothèses	k	AICc	Δ AICc	AICcWT	Cum.wt	LL
TDF + sapin	4	153,18	0,00	0,40	0,40	-71,95
TDF	3	154,83	1,65	0,18	0,58	-74,04
TDF + censure	4	155,54	2,36	0,12	0,70	-73,12
TDF + sapin + censure	5	155,66	2,48	0,12	0,82	-71,83
TDF + IQS	4	156,15	2,97	0,09	0,91	-73,43
TDF + IQS + censure	5	157,26	4,08	0,05	0,97	-72,63
TDF + sapin + IQS +censure	6	158,11	4,93	0,03	1,00	-71,61

Tableau 3.4 : Résultat de la GLM du « meilleur » modèle Indice de vieillissement ~ Temps entre inventaires + temps depuis feu final + pourcentage de sapin.

	Estimation	Écart-type	Valeur Z	Valeur P	% de changement
Intercepte	-4,91	0,636	-7,717	1,190 ^e -14	
Temps entre inventaires	0,041	0,012	3,488	0,0004	4,19
TDF	0,012	0,004	2,940	0,003	1,21
% sapin au premier inventaire	0,026	0,011	2,578	0,009	2,63

En observant les résultats de la GLM pour le meilleur modèle (tableau 3.4), nous constatons que la valeur de l'indice de vieillissement augmente avec la valeur du temps depuis feu final, du temps entre inventaires et du pourcentage de sapin. Le pourcentage de changement correspond au taux auquel l'indice de vieillissement augmente ou diminue pour une unité d'un de nos facteurs à l'étude. La formule utilisée pour « transformer » les estimations en pourcentage de changement est la suivante :

$$\% \text{ de changement} = (\exp(\beta x) - 1) * 100$$

Bx = Valeur d'estimation des facteurs à l'étude (Temps entre inventaires, temps depuis feu final ou % de sapin)

Par exemple, l'indice de vieillissement augmente de 0,121 % à chaque fois que le temps depuis feu final augmente de 1 an. La même logique s'applique pour le pourcentage de sapin. Pour l'indice de vieillissement (figure 3.2), nous constatons qu'autour de 125 ans la fenêtre de bris est commencée, ce qui signifie que la mortalité des arbres de la cohorte 1 a déjà débuté. De plus, un peu après 275 ans, la mortalité des arbres atteint tout juste les 80 %. Selon ces résultats, la fin de la fenêtre de bris (0,8) se conclurait autour de 275 ans et pourrait commencer autour de 100 ans. Après 275 ans, la mortalité est beaucoup moins importante.

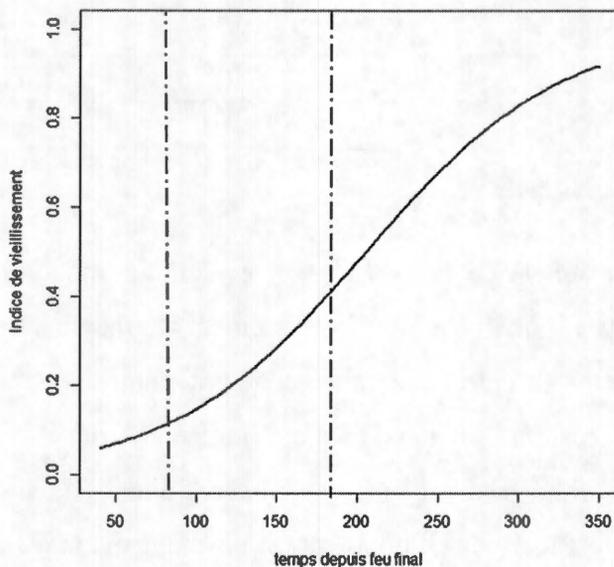


Figure 3.2 : Effet du temps depuis feu sur l'indice de vieillissement pour un pourcentage de sapin moyen. Le temps entre inventaires a été fixé à 25 ans. Le pourcentage moyen de sapin a été utilisé (17,7 %). Une séquence de 100 valeurs a été utilisée pour le temps depuis feu final. Modèle utilisé : Indice de vieillissement = temps depuis feu final + % de sapin. Les deux lignes pointillées représentent la portion de la courbe dont nous avons des valeurs réelles de calculées (temps depuis feu final de 81 à 170 ans). Avant 81 ans et après 170 ans, la courbe représente la prédiction de la valeur de l'indice de vieillissement selon le temps depuis feu (calculée à partir du modèle seulement).

Le pourcentage de sapin est un facteur qui affecte l'indice de vieillissement lorsqu'il est en présence des autres facteurs significatifs (temps entre inventaires et temps depuis feu). Les caractéristiques de la fenêtre de bris changent d'une placette à l'autre selon sa composition en espèces (figure 3.3). En effet, la fenêtre de bris ne commence et ne se termine pas au même moment. Par exemple, pour les placettes n'ayant pas de sapin, la fenêtre de bris commencerait autour de 120 ans tandis que pour les placettes ayant beaucoup de sapin, la fenêtre de bris semble commencer autour de 75 ans. Pour les valeurs entre 10 et 30 % de sapin, l'âge moyen du début semble tourner autour de 90

ans. L'âge pour la fin de la fenêtre de bris est aussi différent selon le pourcentage de sapin dans la placette. Pour les placettes n'ayant pas de sapin, la fenêtre de bris se termine probablement autour de 270 ans. Pour les valeurs de pourcentage de sapin entre 10 et 30 %, la valeur se situe à 250 ans et à 230 ans pour les placettes ayant beaucoup de sapin (40 %).

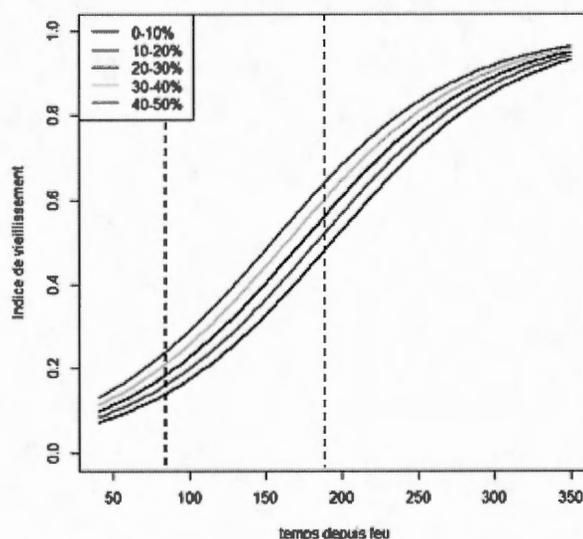


Figure 3.3 : Effet du pourcentage de sapin et du temps depuis feu sur l'indice de vieillissement. Le pourcentage de sapin est celui associé au premier inventaire. Le modèle utilisé est le suivant : Indice de vieillissement \sim Temps depuis feu final + pourcentage de sapin. Une valeur de 25 ans a été utilisée pour fixer le temps entre inventaires. Les deux lignes pointillées représentent la portion de la courbe dont nous avons des valeurs réelles de calculer. Avant 81 ans et après 170 ans, la courbe représente la prédiction de la valeur de l'indice de vieillissement selon le temps depuis feu (calculer à partir des données mesurées).

3.5.2 Indice de recrutement

Comme mentionnée plus haut, l'indice de recrutement mesure le recrutement d'arbre dans l'étage dominant-codominant d'une placette. Dans un premier temps, la valeur de

l'indice de recrutement selon le temps depuis feu pour chaque placette a été observé (voir figure 3.4). Au premier inventaire, l'indice de recrutement est égal à 0 puisque nous ne pouvons identifier clairement le recrutement qui a lieu avant les inventaires, nous considérons donc qu'il n'y a pas de recrutement au premier inventaire. Avant 120 ans, il y a beaucoup de recrutement dans la plupart des placettes (autour de 25 % de recrutement). Par contre, après 120 ans, toutes les placettes ont 25 % de recrutement ou moins. Comme pour l'indice de vieillissement, des analyses d'AICc ont été effectuées (tableau 3.5). Le modèle statistique à privilégier est celui possédant la meilleure valeur d'AICc, soit : Indice recrutement = temps entre inventaires + temps depuis feu final + % de sapin + IQS + censure. Comme la différence entre ce modèle et le deuxième est assez élevée ($\Delta AICc = 55,90$), le premier modèle est sélectionné pour illustrer graphiquement ces résultats. Les résultats de la GLM associée à ce modèle sont présentés au tableau 3.6.

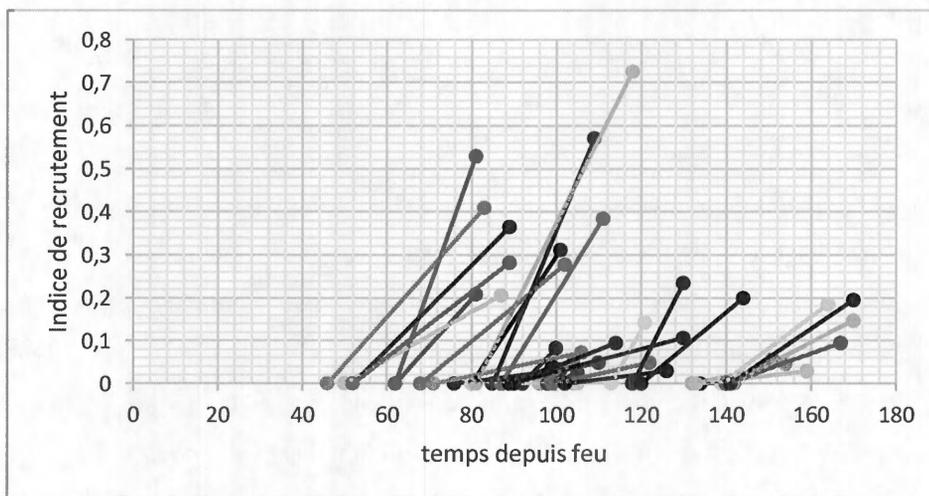


Figure 3.4 : valeur de l'indice de recrutement selon le temps depuis feu pour chaque placette au premier et au dernier inventaire. Chaque droite représente une placette au premier inventaire et au dernier inventaire. (n=37)

Le temps entre inventaires, le temps depuis feu, le pourcentage de sapin et l'IQS sont des facteurs influençant de manière significative l'indice de recrutement. En effet, la

valeur de l'indice de recrutement augmente de 9,19 % lorsque le temps entre inventaires augmente de 1 an. Dans la même logique, la valeur de l'indice de recrutement diminue de 0,40 % lorsque le temps depuis feu augmente de 1 an. De plus, lorsque le pourcentage de sapin dans la placette augmente de 1 %, la valeur de l'indice de recrutement augmente de 5,02 %. Pour finir, lorsque l'IQS augmente d'une unité, la valeur de l'indice de recrutement augmente de 8,22 %. La censure ne semble pas influencer cet indice de manière significative ($pvalue > 0,05$). Avec le modèle sélectionné, nous avons illustré graphiquement les différents facteurs influençant l'indice de recrutement. Pour mieux comprendre l'effet de ces différents facteurs, nous avons fait varier le pourcentage de sapin et la valeur de l'indice de qualité de station. Toutes les données, censurées ou non sont incluses dans ces modèles puisque selon les résultats de la GLM, l'intervalle de confiance est trop élevé pour distinguer une différence significative entre ces deux groupes. Autour de 50 ans, il y aurait environ 60 % de recrutement dans la placette (figure 3.5). Après 250 ans, le recrutement semble plafonner pour rester autour de 10 %. Comme le sapin est aussi une variable influençant la fenêtre de bris et qu'il influence aussi l'indice de vieillissement, nous avons décidé, toujours avec le même modèle, d'observer la prédiction de la valeur de l'indice de recrutement selon le temps depuis feu pour les différentes classes de pourcentage de sapin (figure 3.6). L'indice de recrutement diminue donc au travers de temps. Il est difficile avec cet indice de déterminer à quel moment commence la fenêtre de bris, car il n'y a pas de données observées avant 80 ans. Par contre, cet indice renforce notre idée que la fenêtre de bris se terminerait généralement autour de 250 ans. De manière générale, plus il y a de sapin dans une placette, plus l'indice de recrutement est élevé pour un temps depuis feu donné. Aussi, plus il y a de sapin dans une placette, plus le processus de recrutement est rapide (diminution plus importante). En effet, autour de 230-250 ans le recrutement semble commencer à se stabiliser pour atteindre un plateau. Ce plateau représenterait la mortalité liée à la dynamique des trouées des vieilles forêts.

Tableau 3.5 : Résultat des analyses d'AICc pour les modèles candidats pouvant le mieux expliquer l'indice de recrutement. Le temps entre inventaires est inclus dans chacun de ces modèles.

Modèles	k	AICc	Δ AICc	AICcWt	Cumwt	LL
TDF + sapin + IQS+ censure	6	416,09	0,00	0,5	0,5	-200,60
TDF + sapin + censure	5	471,99	55,90	0,0	1,0	-230,00
TDF + sapin	4	478,99	62,90	0,0	1,0	-234,85
TDF + IQS + censure	5	522,40	106,31	0,0	1,0	-255,20
TDF + IQS	4	529,65	113,56	0,0	1,0	-260,18
TDF + censure	4	546,96	130,87	0,0	1,0	-268,84
TDF	3	554,27	138,18	0,0	1,0	-273,76

Sapin = Pourcentage de sapin au premier inventaire

Tableau 3.6 : Résultat de la GLM pour le modèle suivant : Indice de recrutement ~ Temps entre inventaires (TEI) + temps depuis feu (TDF) + % de sapin + IQS + censure

	Estimation	Erreur Standard	Valeur Z	Valeur	% de changement
Intercepte	-12,96	4,74	-2,73	0,0063	
Temps entre inventaires	0,088	0,024	3,72	0,00020	9,19
TDF	-0,0041	0,0096	-0,42	0,067	-0,40
% de sapin	0,049	0,015	3,27	0,0011	5,02
IQS	0,079	0,33	2,39	0,017	8,22
censure	0,94	0,64	1,47	0,14	-

Finalement, l'effet de l'indice de qualité de station sur l'indice de recrutement a été observé. Plus la valeur de l'indice de qualité de station est élevée, plus il y aura de recrutement dans la placette. Encore une fois, autour de 230-250 ans, le recrutement semble se stabiliser (figure 3.7).

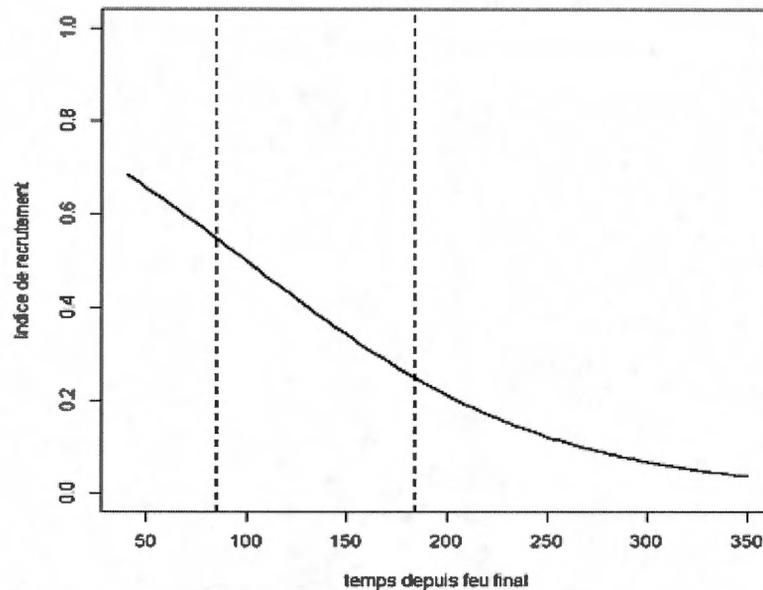


Figure 3.5 : Effet du temps depuis feu sur l'indice de vieillissement pour un pourcentage de sapin et un IQS moyen. Les deux lignes pointillées représentent la portion de la courbe dont nous avons des valeurs réelles de calculer (temps depuis feu final de 81 à 170 ans. Avant 81 ans et après 170 ans, la courbe représente la prédiction de la valeur de l'indice de vieillissement selon le temps depuis feu (calculer à partir des données mesurées). La valeur moyenne de sapin et d'IQS a été utilisée (respectivement 17,7 % et 10,8). Le temps entre inventaires a été fixé sa valeur modale (25 ans). Le modèle utilisé est : $\text{Indice de recrutement} = \text{Temps depuis feu final} + \% \text{ de sapin dans la placette} + \text{Indice de qualité de station} + \text{censure}$.

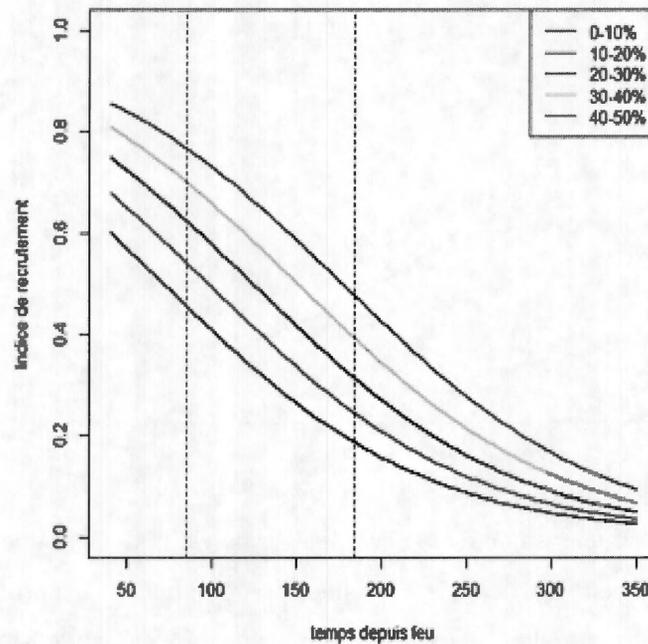


Figure 3.6 : Effet du pourcentage de sapin sur l'indice de recrutement selon le temps depuis feu et pour un IQS moyen. Les lignes de différentes couleurs représentent les différentes classes de pourcentages de sapins. Les deux lignes pointillées représentent la portion de la courbe dont nous avons des valeurs réelles de calculer (temps depuis feu final de 81 à 170 ans. Avant 81 ans et après 170 ans, la courbe représente la prédiction de la valeur de l'indice de vieillissement selon le temps depuis feu (calculer à partir des données mesurées). La valeur moyenne d'IQS a été utilisée (10,8). Le temps entre inventaires a été fixé à sa valeur modale (25 ans). Le modèle utilisé est : $\text{Indice de recrutement} = \text{Temps depuis feu final} + \% \text{ de sapin dans la placette} + \text{Indice de qualité de station} + \text{censure}$.

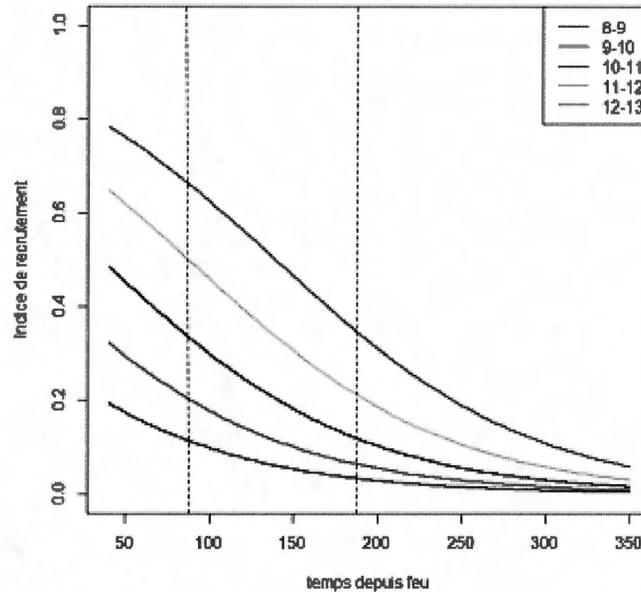


Figure 3.7 : Effet de l'IQS et de l'indice de recrutement selon le temps depuis feu et le pourcentage de sapin moyen. Les lignes de différentes couleurs représentent les différentes classes de pourcentages de sapins. Les deux lignes pointillées représentent la portion de la courbe dont nous avons des valeurs réelles de calculer (temps depuis feu final de 81 à 170 ans. Avant 81 ans et après 170 ans, la courbe représente la prédiction de la valeur de l'indice de vieillissement selon le temps depuis feu (calculer à partir des données mesurées). La valeur moyenne de sapin a été utilisée (17,7%). Le temps entre inventaires a été fixé à sa valeur modale (25 ans). Le modèle utilisé est : $\text{Indice de recrutement} = \text{Temps depuis feu final} + \% \text{ de sapin dans la placette} + \text{Indice de qualité de station} + \text{censure}$.

3.6 Discussion

3.6.1 Facteur influençant la fenêtre de bris

Les modèles, tant pour l'indice de vieillissement que pour celui du recrutement, indiquent l'importance du temps depuis feu au dernier inventaire et du pourcentage de sapin dans la placette au premier inventaire pour le processus de la fenêtre de bris.

Premièrement le temps depuis feu final influence les deux indices de manière significative. En effet, la fenêtre de bris s'opère sur une période variant entre 75-175 ans en moyenne (Belleau et al. 2011, Nguyen-Xuan et al. 2000). Donc, plus le temps depuis feu avance, plus il y aura de mortalité présente dans nos placettes. De plus, lors du processus de bris, plusieurs trouées sont créées dans la canopée par la mort des arbres de la cohorte 1. De ce fait, il y aura beaucoup de recrutement autour de 75-125 ans (début de la fenêtre de bris) et ce recrutement sera de moins en moins important au cours du temps jusqu'à ce que la fenêtre de bris se termine (figure 3.5) (McCarthy 2001). Par la suite, le recrutement se stabilisera et sera lié à la dynamique des trouées qui caractérise les vieilles forêts (Pham et al. 2004, St-Denis et al. 2010).

Deuxièmement, le pourcentage de sapin est aussi un facteur influençant grandement l'indice de vieillissement et l'indice de recrutement. La stratégie de reproduction du sapin baumier n'est pas très adaptée au feu de forêt. En effet, le sapin baumier compte sur une « banque » de semis en sous-étage (Morin 1998). Donc, lorsqu'il y a feu, le sous-étage de semis de sapin baumier est facilement brûlé. Il n'est donc pas une espèce que l'on retrouve habituellement tout de suite après le feu (Viereck 1983), on le retrouve plutôt en fin de succession. Par contre le sapin peut arriver à « coloniser » un territoire qui a brûlé de différente façon. Effectivement, des sapins en bordure du territoire brûlé ou encore dans des îlots de survie peuvent avoir colonisés ce territoire

(Galipeau et al. 1997). Il est alors possible de retrouver du sapin dans les placettes. De plus, le sapin baumier a une espérance de vie plus courte que l'épinette noire. En effet, celui-ci peut avoir une espérance de vie moyenne de 80 ans tandis que l'épinette noire, elle, a une espérance de vie moyenne de 200 ans. Donc, plus il y a de sapin dans la placette, plus les arbres mourront jeunes, et donc la fenêtre de bris devrait commencer et finir plus tôt. Finalement, la présence de sapin dans une placette peut révéler des caractéristiques biophysiques différentes (sol, type de dépôt-drainage, type écologique, etc.). Le sapin a tendance à se retrouver sur des sites ayant des caractéristiques favorisant la productivité et donc la pousse rapide des arbres, (Ghent 1958). Au contraire, l'épinette noire peut pousser sous un large éventail de sites différents (Burns et Honkala et al. 1990). Donc, les placettes avec sapin auraient une fenêtre de bris qui commence et termine plus tôt puisque que celui se retrouve sur des sites favorables à la croissance rapide des arbres et donc à la mort plus rapide de ceux-ci

L'indice de qualité de station (IQS) mesure « la hauteur moyenne qu'un arbre dominant peut atteindre à 50 ans (âge évalué à 1 m de hauteur) sans oppression juvénile et sans effets importants de défoliation par les insectes » (Lafèche et al. 2013). Ce facteur n'influence pas l'indice de vieillissement malgré qu'il soit une mesure de la productivité d'un peuplement. Les peuplements à l'étude ne se situent pas sur une très grande étendue de valeur d'IQS (soit entre 9,5 et 12,5 mètres à 50 ans). Il est possible que l'étendue de données ne soit pas assez élevée pour pouvoir bien observer son effet réel sur la mortalité des arbres de la cohorte 1. De plus, il est possible que d'autres facteurs puissent masquer l'effet de l'IQS, notamment le lien avec le pourcentage de sapin. Par contre, l'IQS est un facteur influençant l'indice de recrutement. En effet, plus la valeur de l'IQS est élevée, plus l'indice de recrutement l'est. Cela peut laisser croire que le phénomène de recrutement est peut-être plus sensible à l'indice de qualité de station (la productivité) que les phénomènes de mortalité.

3.6.2 Vitesse de la fenêtre de bris

La fenêtre de bris semble plus lente et plus longue que ce à quoi on s'attendait, en se basant sur les connaissances actuelles (Belleau et al. 2011, Boucher et al. 2011). La figure ci-dessous présente les résultats attendus (noir) versus les résultats obtenus (rouge). À 160 ans, la fenêtre de bris était environ à mi-parcours (50 % de mortalité chez les arbres de la cohorte 1). Donc, en extrapolant et en se fiant aux résultats, la fenêtre de bris se terminerait environ autour de 250 ans en moyenne. Or, nous attendions plutôt à ce que la fenêtre de bris se termine autour de 175-200 ans. En d'autres mots, la fenêtre de bris est un peu plus lente que ce que nous pensions observer. Il est intéressant de mentionner qu'entre le premier et le dernier inventaire forestier, il s'est passé un maximum de 40 ans, mais en moyenne plutôt 25 ans. Le phénomène de la fenêtre de bris s'étendrait sur environ 100 ans (Lecomte et Bergeron 2005). Il est alors impossible d'observer le bris sur l'entièreté de la fenêtre. La fin de la fenêtre de bris est donc estimée selon les résultats du modèle prédictif et non observée.

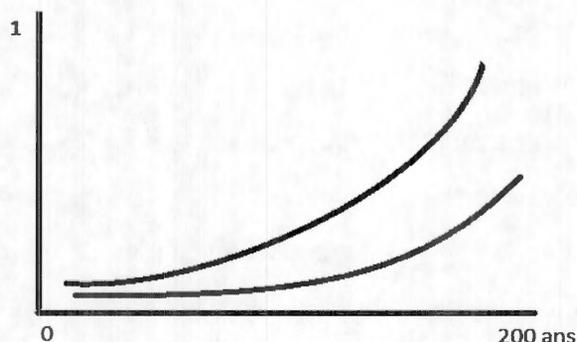


Figure 3.9 : Valeur attendue vs valeur obtenue de l'indice de vieillissement selon le temps depuis feu. La courbe rouge représente les résultats obtenus tandis que la courbe noire représente les résultats attendus rapportés dans la littérature scientifique.

Plusieurs facteurs peuvent être en cause pour expliquer ce phénomène. Premièrement, les données brutes contiennent des limites qui pourraient surestimer

l'âge de bris. Effectivement, nous utilisons les données d'inventaires du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Ces données permettent d'observer des peuplements sur une très grande superficie de territoire et d'avoir en main des données d'inventaires détaillées sans avoir à se déplacer sur le terrain. La méthodologie consiste à observer la mortalité et identifier les arbres de la cohorte 1 au travers du temps. Par contre, il peut être difficile d'identifier ces arbres avec certitude. En effet, surtout pour les placettes plus âgées, il est difficile de savoir ce qui s'est passé avant le premier inventaire. Effectivement, si le peuplement forestier d'une placette est plus âgé que la longévité moyenne des arbres dominants, il est possible que ce même peuplement ait déjà subi des pertes d'arbres de la cohorte 1. Or, à moins que l'arbre soit toujours en relativement bon état (mort debout ou mort couché), il n'était pas répertorié dans les inventaires. Alors, pour les plus vieilles placettes, il manque possiblement certaines données de mortalité. De ces faits, nous croyons que la fenêtre de bris pourrait commencer et terminer plusieurs dizaines d'années plus tôt que ce que nous avons obtenu.

Même si la censure n'influence pas significativement l'indice de recrutement et l'indice de vieillissement ($p\text{value} \geq 0,05$), elle peut toutefois affecter nos résultats. En effet, nous suspectons que lorsque la donnée d'âge est censurée, il y a des chances non négligeables que le peuplement en question ne soit plus en processus de bris. Effectivement, il est possible que la mortalité observée dans ces placettes pourrait plutôt correspondre à celle d'arbres de la cohorte 2 mourant graduellement pour laisser place à ceux de la cohorte 3.

Aussi, l'indice de vieillissement est utile pour bien cerner le début de la fenêtre de bris (donc de l'âge initial de bris), mais qu'il l'est moins pour en cerner la fin. En effet, comme il est possible qu'il manque des arbres de la cohorte 1 dans les calculs, il peut être plus difficile d'observer la fin du bris, surtout pour les placettes les plus âgées. Pour l'indice de recrutement, il peut, au contraire, être difficile de déterminer le début

précis du bris. Par contre, cet indice complémentaire à l'indice de vieillissement peut être utilisé pour déterminer la fin de la fenêtre de bris. En effet, lorsqu'un plateau de recrutement est atteint, les résultats suggèrent que la fenêtre de bris se termine : le peuplement est stable et la dynamique de trouée commence avec ces caractéristiques associées (dynamique de trouée, structure irrégulière, etc. (St-Denis et al. 2010, Kuuluvainen et al.2002 et Harper et al.2003). La synthèse des résultats obtenue pour les deux indices est présentée au tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Début et fin de la fenêtre de bris selon le pourcentage de sapin pour l'indice de recrutement et de vieillissement

	Indice de vieillissement (Début/Fin)	Indice de recrutement (Début/Fin)	Période suggérée	Durée
0,00-10 % de sapin	112/277 ans	80/230 ans	112/230	118
10,01-20 % de sapin	102/260 ans	80/225 ans	102/225	123
20,01-30 % de sapin	90/255 ans	80/220 ans	90/220	130
30,01-40 % de sapin	80/250 ans	80/215 ans	80/215	135
40,01-50 % de sapin	71/233 ans	80/210 ans	71/210	139

Donc, selon le pourcentage de sapin dans la placette, la fenêtre de bris commencerait entre 71-122 ans et terminerait entre 210-230 ans pour une durée moyenne tournant entre 118-139 ans.

3.6.3 Application possible / Aménagement écosystémique

Ces résultats peuvent aider à mieux comprendre la dynamique de succession forestière pour le territoire de la pessière à mousse de la Côte-Nord. Ces connaissances pourraient aider à améliorer l'aménagement forestier actuel. Depuis le début des années 2010, l'aménagement forestier tend vers une tendance écosystémique (Québec, 2011). Les grandes lignes de ce concept veulent que la forêt soit aménagée de sorte à se rapprocher le plus à ce que l'on retrouve dans un paysage forestier naturel, dans le but de maintenir l'intégrité écologique des écosystèmes ainsi que leurs productivités (Gauthier et al. 2008). De ce fait, une des grandes lignes directrices de ce type d'aménagement est de conserver un certain pourcentage de chaque classe d'âge de forêt. Selon le registre des états de référence du Québec (Boucher et al. 2011), nous pouvons séparer la forêt en quatre grandes classes d'âge (tableau 3.8).

Tableau 3.8 : Structure d'âge des peuplements forestiers de la pessière à mousse du Québec

Structure d'âge				
	Régénération	Intermédiaire	Vieux	Vieux irrégulier
Pessière à mousse	0-20 ans	21-100 ans	≥101 ans	≥ 201 ans

Bien que les registres des états de référence soient d'excellentes références pour le territoire en entier de la pessière à mousse, notre travail a permis de spécifier pour des peuplements forestiers ayant des caractéristiques précises à quel moment la phase vieille forêt commence à s'installer (début de la fenêtre de bris) et le temps mis pour le remplacement presque entier de la première cohorte. Pour des peuplements situés au nord-ouest de Sept-Îles, le stade de transition entre un jeune et un vieux commencerait entre 71 et 112 ans, dépendamment de la composition forestière. Cette période de transition correspond au début du stade vieux du tableau 3.8. La période de bris, se

terminerait entre 210 et 230 ans, dépendamment de la composition forestière présente dans le peuplement. La transition est donc beaucoup plus longue que ce qu'on imaginait.

Donc, la fenêtre de bris pourrait commencer un peu plus tôt que 101 ans pour certains peuplements, mais elle se terminerait un plus tard que les 201 ans proposés par les états de références pour la caractérisation des vieux peuplements irréguliers. Les états de références sont une moyenne générale de la structure d'âge retrouvée pour le territoire de la pessière à mousse. Nous croyons donc que le territoire de la Côte-Nord possède des peuplements forestiers plus lents à acquérir le statut de vieilles forêts que ceux présents en à l'ouest. Puisque l'AFÉ vise la conciliation de l'utilisation des ressources forestières avec la nécessité de protéger les vieux écosystèmes forestiers (Gauthier et al. 2008), bien identifier le moment auquel le peuplement commence son stade de vieillesse pourrait améliorer l'aménagement forestier.

4. CHAPITRE II : ÉTUDE DE FACTEURS CONTRÔLANT LES CARACTÉRISTIQUES DE LA FENÊTRE DE BRIS DE LA PESSIÈRE À MOUSSE DU QUÉBEC ; UNE PERCEPTIVE RÉGIONALE

4.1 Introduction

La protection de la biodiversité de la forêt boréale du Québec est associée à la rétention des caractéristiques structurelles habituellement associée aux forêts âgées (Gauthier et al. 2010). Depuis quelques années, la protection de cette biodiversité est assurée par l'aménagement forestier écosystémique (AFÉ), un régime d'aménagement « conçu pour mettre en œuvre un développement forestier durable à travers la gestion écosystémique » (Gouvernement du Québec, 2017). L'AFÉ consiste, en résumé, à aménager la forêt pour qu'elle se rapproche de la forêt naturelle, malgré les interventions humaines (Gauthier et al. 2010). La principale perturbation qui module la forêt boréale est les feux de forêt. En effet, les feux de forêt créent une mosaïque de parcelles de forêt ayant des structures internes, des âges et des compositions forestières différentes (Johnson 1992). Comme le domaine de la pessière à mousse noire couvre un très grand territoire, le cycle de feu n'est pas le même partout. En effet, le cycle de feu de forêt à l'ouest de la pessière à mousse du Québec est assez court (environ 100 ans), tandis que celui à l'est est plutôt long (500 ans) (Boucher et al. 2011). Un cycle de feu court favorisera la création d'une mosaïque forestière à majorité de jeunes peuplements tandis qu'un cycle long favorisera une mosaïque forestière à majorité de forêts âgées (Johnson et al. 1993). De plus, dans le contexte des changements climatiques, le degré auquel la forêt boréale sera résiliente à des « nouveaux » régimes de perturbation « aura des conséquences directes sur l'approvisionnement de services et sur l'aménagement forestier à long terme » (De Grandpré et al., 2018). Comme les vieilles forêts sont considérées importantes pour la résistance et la résilience de la forêt boréale, il est important de bien comprendre comment se forme les vieilles forêts, surtout dans le contexte des changements climatiques. L'objectif principal de ce

chapitre est d'observer les facteurs pouvant influencer la fenêtre de bris ainsi que ses caractéristiques temporelles (début, fin et vitesse), et ce, pour les différentes régions écologiques de la pessière à mousse du Québec. La définition de la fenêtre de bris est la suivante : Étendue d'âge durant laquelle les individus de la cohorte 1 vont mourir progressivement pour laisser place à ceux de la cohorte 2 (voir figure 4.1) (Bergeron et al., 1999) :

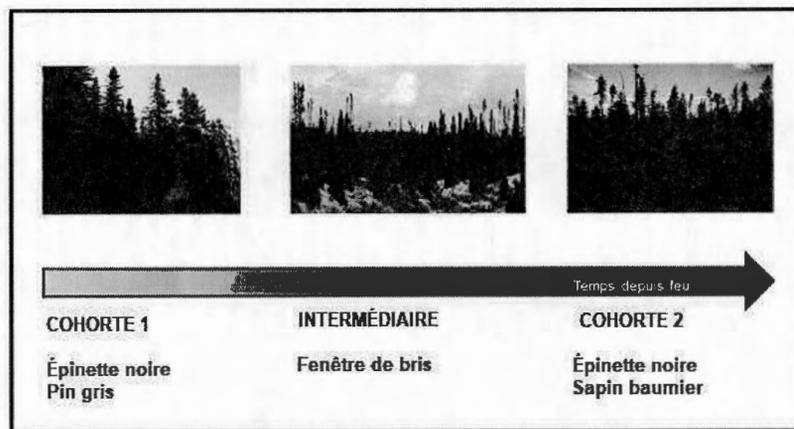


Figure 4.1 : Schéma simplifié de la dynamique forestière de la pessière à mousse noire.

À l'échelle de toute la pessière à mousse du Québec, les facteurs pouvant influencer la fenêtre de bris seront identifiés. Ces facteurs sont le temps depuis feu, le pourcentage de sapin dans la placette, l'indice de qualité de station et la position géographique (région écologique) de la placette. Premièrement, le temps depuis feu est un facteur influençant directement la fenêtre de bris. En effet, après un feu, une première cohorte d'arbres (cohorte post-perturbation) va s'établir. Avec le temps, cette cohorte va mourir progressivement pour laisser place à une deuxième cohorte d'arbres. Selon la tranche d'âge choisie pour ce chapitre, plus l'âge de la placette est élevé, plus le processus de la fenêtre de bris sera avancé (plus de mortalité des arbres de la cohorte 1) (Bergeron et al. 1999). Le sapin baumier est reconnu pour être présent sur des sites plus productifs. Plus il y aura de sapin dans la placette, plus la fenêtre de bris commencera et se finira tôt. Aussi, le sapin est une espèce très sensible à la TBE (tordeuse des bourgeons de

l'épinette). Donc, plus il y a de sapin dans une placette, plus il y a de chance d'observer de la mortalité causée par les épidémies de TBE (Morin 1998). L'indice de qualité de station (IQS) est une mesure de productivité, plus la valeur de l'IQS est élevée pour une placette, plus celle-ci commencera et finira plus tôt sa fenêtre de bris. Finalement, comme la pessière à mousse du Québec couvre un très grand territoire, elle est séparée en plusieurs régions écologiques. Ces régions sont caractérisées par un régime climatique différentiel (température, précipitation et saison de croissance moyenne) (Robitaille et Saucier 1998) et un cycle de feu différent. En présence de température clémente, de longue saison de croissance, de précipitation abondante et d'un cycle de feu court, la fenêtre de bris commencera et finira plus tôt. Donc, le climat et le régime de feu pourraient avoir une influence sur les caractéristiques de la fenêtre de bris.

4.2 Matériel et méthode

Voir section 1.4 pour la méthodologie associée aux calculs des indices de vieillissement et de recrutement. Pour ce chapitre, nous avons ajouté un filtre de sélection supplémentaire. En effet, nous n'avons sélectionné que les placettes présentes sur un dépôt glaciaire épais.

4.3 Regroupement des régions écologiques selon le climat

Parmi les placettes présentes sur le territoire de la pessière à mousse, 113 placettes correspondaient aux critères recherchés (matériel supplémentaire 2). Ces placettes sont distribuées dans de nombreuses régions écologiques (16). Pour le traitement statistique, la région écologique est donc une variable qualitative ayant plusieurs niveaux. Chaque région est nommée par le nom d'une lettre de l'alphabet et le nombre 6 correspond au domaine de la pessière à mousse: 6a, 6b, 6c, 6d, 6e, 6f, 6g, 6h, 6i, 6j, 6k, 6l, 6n, 6p, 6q et 6r. Pour des fins statistiques, ces régions ont d'abord été réunies en 6 groupes en se basant sur les caractéristiques du climat présent dans la région écologique

(température moyenne, précipitation moyenne et longueur de la saison de croissance). Cela permet d'obtenir un nombre intéressant de placettes par groupe (pour des analyses statistiques plus robustes) (tableau 4.1).

Tableau 4.1 : Regroupement des régions écologiques de la pessière à mousse selon le climat.

	Région	Nb placettes
Groupe 1	ABD	24
Groupe 2	CE	23
Groupe 3	FG	11
Groupe 4	HIJ	26
Groupe 5	KL	16
Groupe 6	NPQR	13

Avec le meilleur modèle statistique pour l'indice de vieillissement et de recrutement, nous avons d'abord vérifié si nous pouvions réunir certains de ces groupes de régions écologiques en plus grands groupes avec des tests pairés (Tukey test). Il n'était pas possible de réunir en plus grands groupes nos régions écologiques (Matériel supplémentaire 4).

4.4 Analyses statistiques

Plusieurs facteurs peuvent avoir une influence sur la valeur de l'indice de vieillissement et de recrutement (tableau 4.2).

Tableau 4.2 : Définition et explication des facteurs pouvant influencer la valeur de l'indice de vieillissement et de recrutement (a) et effet attendu de ces facteurs sur l'indice de vieillissement et de recrutement (b)

(a)

Facteurs	Définition	Étendue des données	Unité de mesure
TDF	Âge de la placette au dernier inventaire. Correspond au temps depuis le dernier feu survenu sur le territoire d'une placette.	81 à 170 ans	Temps (années)

Censure	L'âge de la placette est censuré lorsque qu'on ne connaît pas le temps depuis le dernier feu. L'âge correspondra alors plutôt à l'âge du plus vieil arbre de la placette.	0 : non censuré 1 : censuré	
IQS	Se définit par la hauteur moyenne des arbres dominants d'un peuplement à un âge de référence, habituellement 50 ans. Mesure de productivité.	8,5 à 13	Hauteur moyenne des arbres à 50 ans.
Sapin	Pourcentage du nombre de tiges de sapin baumier dans une placette	0 à 50	%
Région écologique	Position géographique de la placette	Groupes regroupés selon leur climat	

(b)

Facteur	Effet attendu sur l'indice de vieillissement	Effet attendu sur l'indice de recrutement
TDF	Plus le temps depuis feu final est élevé, plus la mortalité sera élevée puisque le processus de la fenêtre de bris sera bien entamé.	Plus une placette à un temps depuis feu final élevé, moins il y aura de recrutement dans la placette.
Censure	Les placettes censurées pourraient plutôt être des placettes dont le processus de succession est déjà bien entamé.	Les placettes dont l'âge est censuré pourraient plutôt être des placettes dont le processus de succession est déjà bien entamé.
IQS	Plus une placette est productive (IQS élevé), plus le remplacement de la cohorte 1 se fera rapidement. La mortalité commencera plus tôt dans le temps	Plus une placette est productive (IQS élevé), plus le remplacement de la cohorte 1 se fera rapidement. Le recrutement commencera plus tôt dans le temps
Sapin	Plus il y a de sapin dans une placette, plus le ratio serait élevé. Effectivement, le sapin est une espèce de mi-succession et a une espérance de vie moins élevée que l'épinette noire.	Plus il y a de sapin dans une placette, plus il y aura tendance à avoir de recrutement dans la placette. Le sapin a une espérance de vie moins élevée que l'épinette noire.

Régions écologiques	Les évènements de mortalité auront des caractéristiques différentes selon la position de la placette. Chaque regroupement de régions écologiques a des caractéristiques climatiques différentes qui peuvent influencer les évènements de mortalité.	Les évènements de recrutements auront des caractéristiques différentes selon la position de la placette. Chaque regroupement de régions écologiques a des caractéristiques climatiques différentes
----------------------------	---	--

Dans le but de mieux comprendre quels facteurs peuvent influencer le phénomène de la fenêtré de bris (donc l'indice de vieillissement et l'indice de recrutement), des modèles de régression logistique de type GLM (modèle linéaire généralisé) à distribution binomiale ont été utilisés. On cherche alors à expliquer une variable réponse Y (indice de vieillissement ou indice de recrutement) par une ou plusieurs variables explicatives X (présenté au tableau 4.2). La variable réponse et les variables explicatives sont liées par une relation (lien) de type logit. Pour une GLM à distribution binomiale, les indices de vieillissement et de recrutement sont représentés sous forme d'évènement/essais. Par exemple, la forme de l'équation contenant la plupart des facteurs à l'étude pour l'indice de vieillissement serait la suivante :

$$\frac{Nb \text{ d'arbres morts } (C1)}{Nb \text{ d'arbres vivants } (C1)} = \frac{1}{1 + \exp (TEI * X1 - TDF * X2 - \%SAPIN * X3 - IQS * X4 - Censure * X5)}$$

Nb : Nombre

C1 : Cohorte 1

TEI : temps entre inventaires

TDF : Temps depuis feu final

% de sapin : Pourcentage de sapin au premier inventaire

IQS : Indice de qualité de station

Plusieurs hypothèses biologiques pouvant expliquer l'indice de vieillissement ou de recrutement ont été posés (voir tableau 4.3.) Nous avons utilisé le package «AICcmodavg» (Mazerolle 2017, logiciel R) pour calculer des valeurs AIC (Akaike's

information criterion) permettant ainsi de comparer ces modèles et de « choisir » le meilleur modèle pour la suite des analyses.

Tableau 4.3 : Liste de Modèle statistique candidat par hypothèse pouvant expliquer l'indice de vieillissement et de recrutement.

MODÈLES	HYPOTHÈSE
TDF	Les événements de mortalité et de recrutement sont influencés par l'âge de la placette au dernier inventaire. En effet, plus une placette est âgée, plus il y aura de mortalité observée. Comme le recrutement est associé aux jeunes placettes, plus l'âge de la placette est élevé, moins il y aura de recrutement dans celle-ci.
TDF+ région écologique	Les événements de mortalité et de recrutement sont influencés par l'âge de la placette. La fenêtre de bris pourrait commencer et se finir plus tôt ou plus tard selon le climat
TDF+ région écologique + sapin	Les événements de mortalité et de recrutement sont influencés par l'âge de la placette et le climat Le pourcentage de sapin aurait une influence sur la mortalité et le recrutement. En effet, plus il y a de sapin dans une placette, plus la mortalité associée à la fenêtre de bris commencerait tôt et de manière plus importante. Comme il y aura plus de mortalité dans la placette, il y aurait aussi plus de recrutement.
TDF + région écologique + censure	Les événements de mortalité et de recrutement sont influencés par l'âge de la placette, le climat ainsi que le pourcentage de sapin La censure influence aussi nos résultats puisque certaines placettes n'ont pas un âge de déterminé de manière précise.
TDF +région écologique + IQS	Les événements de mortalité et de recrutement sont influencés par l'âge de la placette, le climat et le pourcentage de sapin aux différents inventaires L'indice de qualité de station étant une mesure de productivité, plus une placette possède un IQS élevé, plus la mortalité associée à la cohorte 1 commencera tôt et de manière plus prononcée. Comme il y aura plus de mortalité dans la placette, il y aurait aussi plus de recrutement.

TDF + région écologique + sapin + censure	Les évènements de mortalité et de recrutement sont influencés par l'âge de la placette aux différents inventaires, le climat, le pourcentage de sapin dans la placette et la censure de l'âge.
TDF + région écologique + IQS + censure	Les évènements de mortalité et de recrutement sont influencés par l'âge de la placette aux différents inventaires, le climat, l'indice de qualité de station et la censure de l'âge.
TDF + région écologique + sapin + IQS + censure	Les évènements de mortalité et de recrutement sont influencés par l'âge de la placette aux différents inventaires, le climat, le pourcentage de sapin, l'indice de qualité de station et la censure
(TDF)*(sapin + région écologique)	Les évènements de recrutement et de mortalité sont influencés par l'âge de la placette au différent inventaire. L'âge de la placette n'est pas indépendant du % de sapin et de la région écologique. Le % de sapin est dépendant de la région écologique.
(TDF)*(région écologique) + sapin	Les évènements de recrutement et de mortalité sont influencés par l'âge de la placette au différent inventaire. L'âge de la placette n'est pas indépendant de la région écologique. Le pourcentage de sapin est indépendant de la région écologique et du temps depuis feu
(TDF)*(sapin) + région écologique	Les évènements de recrutement et de mortalité sont influencés par l'âge de la placette au différent inventaire. L'âge de la placette n'est pas indépendant du pourcentage de sapin. La région écologique est indépendante du pourcentage de sapin et du temps depuis feu
(TDF)*(sapin)	Les évènements de recrutement et de mortalité sont influencés par l'âge de la placette au différent inventaire. Le % de sapin est dépendant du temps depuis feu
(TDF)*(région écologique)	Les évènements de recrutement et de mortalité sont influencés par l'âge de la placette au différent inventaire. La région écologique est dépendant du temps depuis feu

Sapin : Pourcentage de sapin dans la placette au premier inventaire

Il est important de mentionner que le temps entre inventaires est inclus dans tous les modèles du tableau 4.3. En effet, le temps entre inventaires n'a pas directement d'effet biologique sur le phénomène de la fenêtre de bris. Par contre, comme le temps entre le

premier et le dernier inventaire n'est pas le même pour toutes les placettes, il influence tout de même les résultats (le temps entre deux inventaires varie de 8 à 40 ans). Le temps depuis feu au premier inventaire a aussi été testé pour les modèles statistiques au lieu du temps entre inventaires. Les résultats étant identiques, le temps entre inventaires a été utilisé comme variable pour faciliter l'interprétation.

Le modèle ayant la plus basse valeur d'AICc, autant pour l'indice de vieillissement et de recrutement a été sélectionné et utilisé pour observer graphiquement l'effet des différents facteurs sur les indices de vieillissement et de recrutement. Les « meilleurs » modèles ont été vérifiés pour s'assurer qu'ils sont bien ajustés à nos données (valeurs extrêmes, effet de levier, distance de Cook, multicollinéarité et pouvoir prédictifs du modèle).

4.5 Résultats

4.5.1 Indice de vieillissement

Dans un premier temps, l'indice de vieillissement selon le temps depuis feu, et ce pour chacune de nos 113 placettes, a été observé. Entre 50 et 100 ans, l'indice de vieillissement semble se situer autour de 0,2 (20 % de mortalité), à l'exception de quelques placettes qui ont des valeurs plus élevées. Après 100 ans, la plupart des placettes ont des valeurs d'indice de vieillissement supérieur à 20 % de mortalité (indice de vieillissement égal à 0,20). De manière générale, il semble il y avoir une tendance à l'augmentation de l'indice de vieillissement avec le temps depuis feu, donc l'âge de la placette.

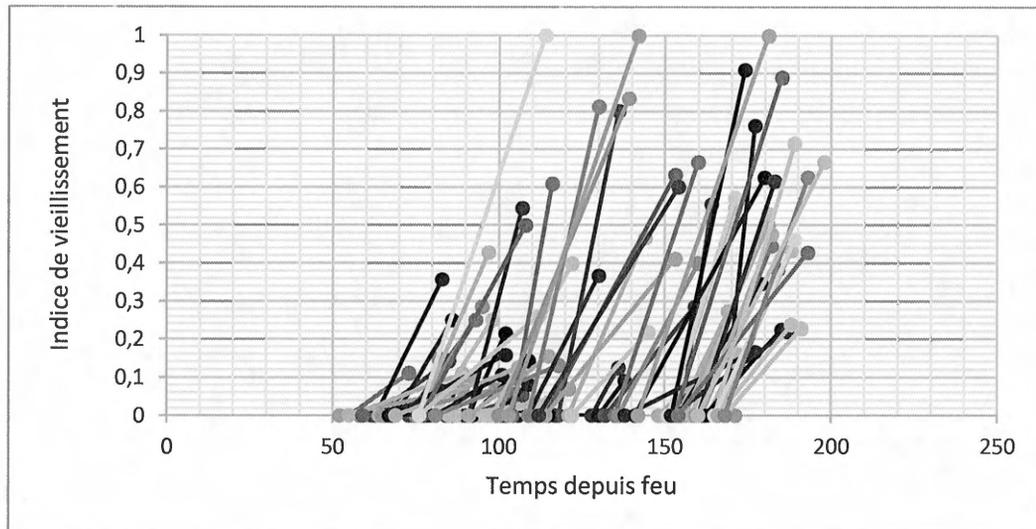


Figure 4.2 : Valeur de l'indice de vieillissement selon le temps depuis feu final par placette au premier et au dernier inventaire (n=113).

4.5.2 Modèle statistique indice de vieillissement

Comme plusieurs facteurs pourraient influencer le processus de la fenêtre de bris, plusieurs hypothèses biologiques pouvant expliquer ce phénomène ont été posé (voir tableau 4.3). Avec le package de Mazerolle (2013), l'AIC de chacun de nos modèles biologiques a été calculé pour pouvoir déterminer lequel ou lesquels seraient à privilégier pour la suite des analyses. Nous avons commencé par déterminer quel était le meilleur modèle pour l'indice de vieillissement. Le meilleur modèle statistique est le suivant : (Temps entre inventaires + ((temps depuis feu final) * (régions écologiques + % de sapin au premier inventaire))). Il n'y a pas de problème de multicolinéarité ($VIF \leq 2$). Par la suite, avec le meilleur modèle, nous avons effectué une analyse de GLM pour mieux observer l'effet des facteurs et des différentes interactions sur l'indice de vieillissement (figure 4.5):

Tableau 4.4 : Résultat des tests d'AICc pour les modèles candidats pouvant le mieux expliqué l'indice de vieillissement

Modèles	K	AICc	Δ AICc	AICcWt	CumWt	LL
(TDF) * (sapin+ régions écologiques)	15	1975,94	0,00	1,00	1,00	-970,47
(TDF) * (sapin) + régions écologique	10	2071,41	95,47	0,00	1,00	-1024,62
(TDF) * (régions écologiques) + sapin	14	2102,59	126,65	0,00	1,00	-1035,13
TDF + régions écologiques + sapin + IQS + censure	11	2106,17	130,23	0,00	1,00	-1040,76
TDF + régions écologiques + sapin + censure	10	2106,75	130,81	0,00	1,00	-1042,29
TDF + régions écologiques + sapin	9	2127,05	151,11	0,00	1,00	-1053,64
TDF * régions écologiques	13	2135,96	160,02	0,00	1,00	-1053,13
TDF + régions écologiques + censure	9	2143,59	167,65	0,00	1,00	-1061,91
TDF + régions écologiques + IQS + censure	10	2146,00	170,06	0,00	1,00	-1061,91
TDF + régions écologiques	8	2198,71	222,77	0,00	1,00	-1090,66
TDF + régions écologiques + IQS	9	2200,99	225,05	0,00	1,00	-1090,61
TDF + sapin	5	2217,43	241,49	0,00	1,00	-1103,43
TDF	3	2390,35	414,40	0,00	1,00	-1192,06

Sapin = % de sapin au premier inventaire

Tableau 4.5 : Résultats des GLM pour le « meilleur » modèle statistiques pouvant expliquer l'indice de vieillissement

Indice de vieillissement = (Temps entre inventaires+ ((temps depuis feu final) *(pourcentage de sapin + régions écologiques)))

	Estimation	Erreur standard	Valeur Z	Valeur P
Intercepte	-3,684	2,678 ^e -01	-13,759	<2,00 ^e -16
TEI	2,519 ^e -02	3,545 ^e -03	7,107	1,19 ^e -12
TDF	1,665 ^e -02	1,635 ^e -03	10,187	<2,00 ^e -16
SAPIN	1,193 ^e -01	9,512 ^e -03	12,547	<2,00 ^e -16
6CE	-2,503	4,054 ^e -01	-6,175	6,62 ^e -10
6FG	5,478 ^e -01	4,334 ^e -01	1,264	0,206
6HIJ	-1,634	3,668 ^e -01	-4,456	8,35 ^e -06
6KL	-5,366 ^e -01	4,202 ^e -01	-1,277	0,202
6NPQR	-4,525	5,895 ^e -01	-7,676	1,64 ^e -14

TDF : Sapin	-7,835 ^e -04	6,913 ^e -05	-11,333	<2,00 ^e -16
TDF : 6CE	2,259 ^e -02	3,170 ^e -03	7,125	1,04 ^e -12
TDF : 6FG	-3,308 ^e -03	2,824 ^e -03	-1,172	0,241
TDF : 6HIJ	1,201 ^e -02	2,407 ^e -03	4,992	5,97 ^e -07
TDF : 6KL	-1,946 ^e -03	2,771 ^e -03	-0,702	0,483
TDF : 6NPQR	2,762 ^e -02	3,927 ^e -03	7,035	2,00 ^e -12

4.5.3 Facteurs influençant l'indice de vieillissement

Pour bien comprendre l'effet de la région écologique sur l'indice de vieillissement, le modèle sélectionné ci-haut a été utilisé pour observer l'évolution de l'indice de vieillissement selon leurs positions géographiques (régions écologiques). Comme mentionné dans la méthodologie, la fenêtre de bris commence autour de 20 % de mortalité (indice de vieillissement = 0,20) et pourrait terminer autour de 80 % de mortalité des arbres de la cohorte 1 (indice de vieillissement = 0,80). Le meilleur modèle possède des interactions (temps entre inventaires + ((temps depuis feu) * (% pourcentage de sapin + régions écologiques))). L'effet du sapin dépend de la région écologique et vice-versa (tableau 4.6). L'effet de la région écologique et du pourcentage de sapin moyen par région sur la valeur de l'indice de vieillissement au travers du temps a été illustré (figure 4.3).

Tableau 4.6 : Âge de début, de fin et durée de la fenêtre de bris selon le pourcentage moyen, le 1^{er} et le dernier quartile de sapin dans les différentes placettes.

Région écologique.	Pourcentage de sapin moyen	1^{er} quartile	Dernier quartile	Début	Fin	Durée
ABD	0.8	0	1	81	255	174
CE	9	0	27	88	175	87
FG	2	0	3	54	289	235
HIJ	16	0	30	71	242	171
KL	4	0	6	130	340	210
NPQR	10	1	20	130	206	136

La fenêtre de bris semble rapide pour les régions CE et NPQR (début tardif, mais la fin du bris est atteinte rapidement). Par la suite, les régions HIJ, ABD et FG ont des fenêtres de bris qui commencent autour de 50 ans et finissent autour de 250 ans. Finalement, la région KL semble posséder la fenêtre de bris la plus lente (début autour de 125 ans et fin autour de 350 ans).

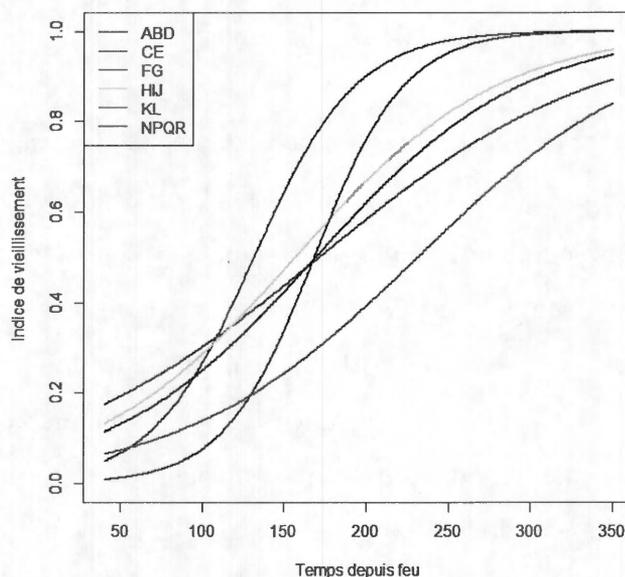
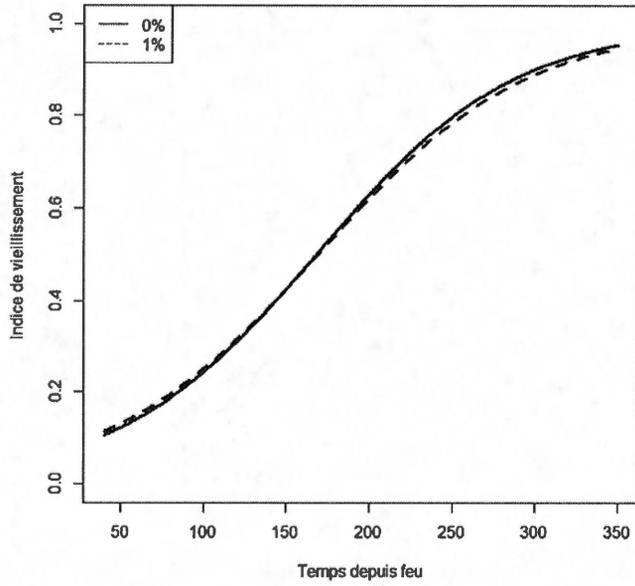
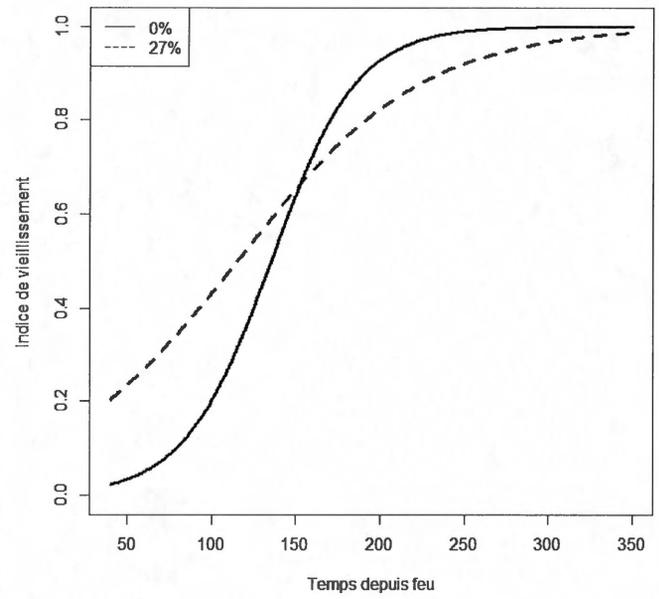


Figure 4.3 : Effet du temps depuis feu et du pourcentage de sapin par régions écologiques selon l'indice de vieillissement. Le temps entre inventaires a été fixé à 35 ans (valeur médiane). Le % de sapin moyen de chaque région est aussi utilisé. Le modèle illustré est le suivant : Indice de vieillissement \sim (Temps entre inventaires + ((temps depuis feu) * (Pourcentage de sapin dans la placette + région écologique))).

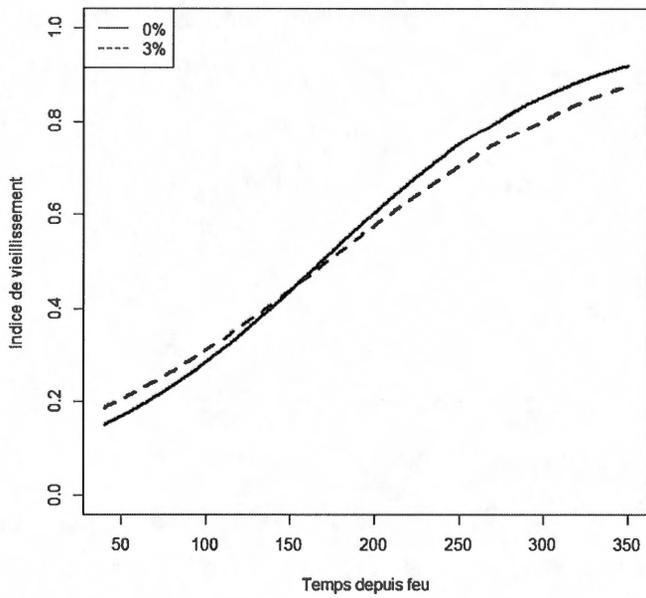
ABD



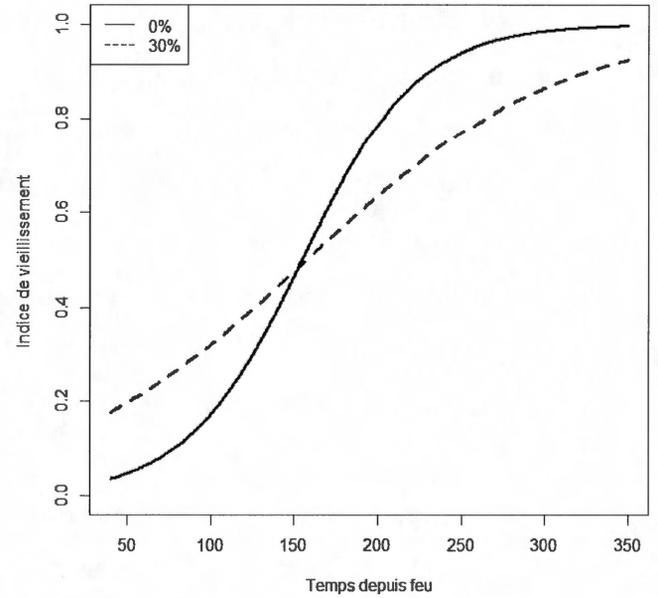
CE



FG



HIJ



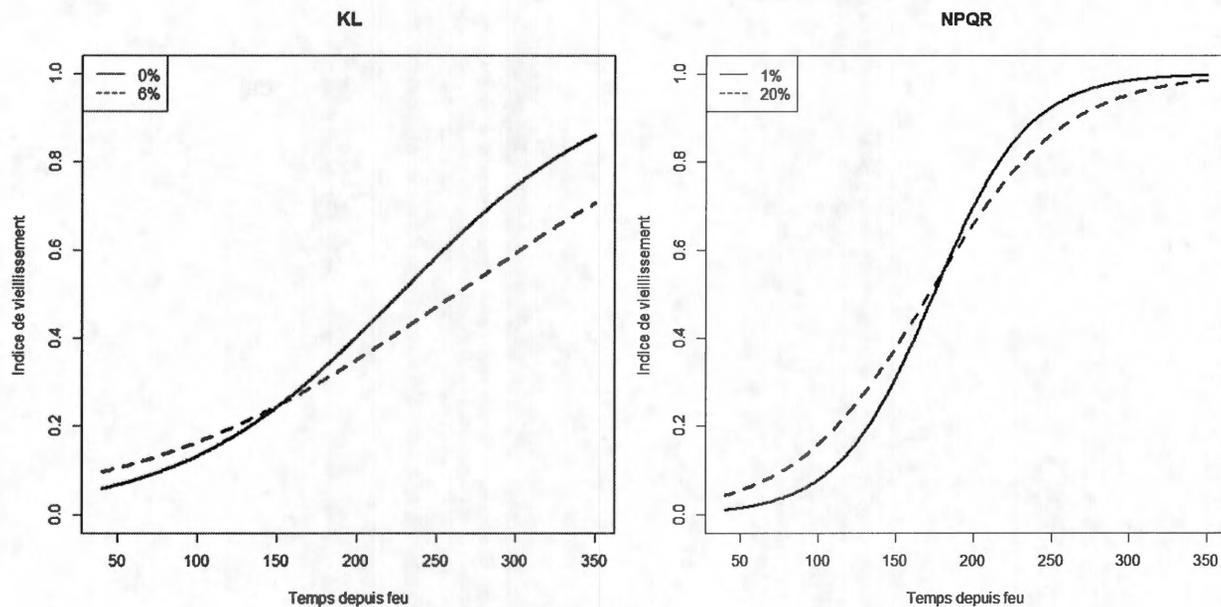


Figure 4.4 : Effet du pourcentage de sapin (1^{er} et dernier quartile régional) et du temps depuis feu sur l'indice de vieillissement pour la région écologique ABD, CE, FG, HIJ, KL et NPQR. Un temps entre inventaires de 35 ans a été utilisé. Modèle utilisé : $\text{Indice de vieillissement} = (\text{Temps entre inventaires} + ((\text{temps depuis feu}) * (\text{région écologique} * \text{pourcentage de sapin})))$

Pour mieux comprendre l'effet du sapin dans la placette, la valeur du premier et du troisième quartile de l'étendue des données de pourcentage de sapin dans les placettes ont été calculé pour chaque région écologique (figure 4.4). De façon générale, plus il y a de sapin dans une placette, plus la fenêtre de bris commence tôt. Par contre, peu importe le pourcentage de sapin, elle semble terminer environ au même moment à quelques années près. L'augmentation de l'indice semble être plus graduelle quand il y a beaucoup de sapin que lorsque la quantité de sapin est moindre. Par exemple, les régions HIJ, CE et NPQR, qui ont des étendues de pourcentage de sapin plus importantes, ont une fenêtre de bris qui termine une trentaine à une cinquantaine d'années plus tôt lorsqu'il y a peu de sapin dans la placette. Ainsi dans ces régions, plus il y a de sapin dans la placette, plus la fenêtre de bris est longue. L'effet est plus

prononcé dans certaines régions où la différence entre les placettes avec peu ou beaucoup de sapin est plus grande.

4.5.4 Indice de recrutement

Le recrutement pour chacune de nos placettes entre le premier et le dernier inventaire a été observé :

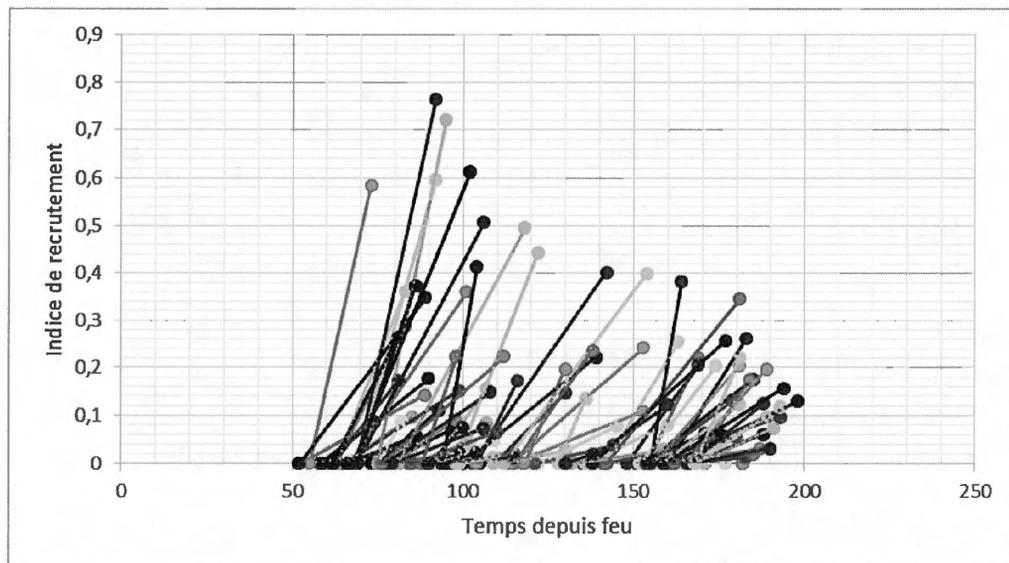


Figure 4.5 : Valeur de l'indice de recrutement selon le temps depuis feu par placette au premier et au dernier inventaire (n=113)

Entre 50 et 100 ans, l'indice de recrutement est assez élevé pour la plupart des placettes, celle-ci ayant des valeurs tournant autour de 40 % de recrutement dans la placette. Entre 100 ans et environ 160 ans, le recrutement semble se situer en moyenne autour de 20 %. Après 160 ans, le recrutement semble commencer à être moins important dans les placettes. De manière générale, le recrutement dans la placette semble diminuer avec le temps depuis feu.

4.5.5 Modèles statistiques – Indice de recrutement

Par la suite, la même logique que pour l'indice de vieillissement pour déterminer le meilleur modèle pour l'indice de recrutement a été appliquée. Les trois premiers modèles ont des valeurs d'AIC très rapprochées (moins de 5,00 AIC de différence) (Burnham et Anderson, 2002).

Tableau 4.7 : Résultats des analyses d'AICc pour les modèles candidats pouvant le mieux expliquer l'indice de recrutement. Le temps entre inventaires est inclus dans chacun de ces modèles.

Modèle	k	AICc	Δ AICc	AICcWT	Cum.wt	LL
(TDF) * régions	13	1121,27	0,00	0,65	0,65	-545,93
(TDF * régions) + sapin	14	1123,57	2,00	0,24	0,89	-545,62
(TDF) * (régions +sapin)	15	1126,15	4,57	0,07	0,96	-545,57
TDF + régions + sapin + IQS + censure	11	1127,35	5,77	0,04	1,00	-551,35
TDF + région + sapin +censure	10	1131,57	9,99	0,00	1,00	-554,69
TDF + régions + IQS + censure	10	1138,80	17,22	0,00	1,00	-558,31
TDF + régions +censure	9	1138,85	17,28	0,00	1,00	-559,54
TDF + région +IQS	8	1147,10	25,53	0,00	1,00	-564,85
TDF + région écologique	9	1147,43	25,86	0,00	1,00	-563,83
TDF + région + sapin	9	1147,57	25,99	0,00	1,00	-563,90
(TDF*sapin) + région	10	1149,57	27,99	0,00	1,00	-563,69
TDF	3	1355,39	233,82	0,00	1,00	-674,59
TDF + sapin	5	1427,09	235,23	0,00	1,00	-673,12

Sapin : Pourcentage de sapin au premier inventaire

Le modèle Temps depuis feu * (régions écologiques + sapin) n'a pas une valeur d'AICc très éloignée du meilleur modèle. Il contient les mêmes facteurs que le modèle expliquant le mieux l'indice de vieillissement. Celui-ci a été sélectionné pour mieux observer les effets des mêmes facteurs et interactions sur l'indice de recrutement que sur celui de mortalité (tableau 4.9). Il n'y a pas de problème de multicollinéarité entre nos variables ($VIF \leq 2$).

Tableau 4.8 : Résultats des GLM pour le modèle suivant :

Indice de vieillissement = (Temps entre inventaires+ ((temps depuis feu final) *(pourcentage de sapin + régions écologiques)))

	Estimation	Erreur standard	Valeur Z	Valeur P
Intercepte	-3,366	3,750 ^e -01	-8,976	<2,00 ^e -16
TEI	4,026 ^e -02	4,111 ^e -03	9,793	<2,00 ^e -16
TDF	1,659 ^e -03	2,405 ^e -03	0,690	0,4903
6CE	1,690	4,860 ^e -01	3,476	0,0005
6FG	3,643	4,828 ^e -01	7,545	4,51 ^e -14
6HIJ	1,436	4,436 ^e -01	3,238	0,0012
6KL	-4,224 ^e -01	6,756 ^e -01	-0,625	0,5318
6NPQR	2,440	5,699 ^e -01	4,281	1,86 ^e -05
% SAPIN	-6,047 ^e -03	1,201 ^e -02	-0,504	0,6146
TDF : 6CE	-1,054 ^e -02	3,902 ^e -03	-2,708	0,0069
TDF : 6FG	-1,876 ^e -02	3,375 ^e -03	-5,559	2,71 ^e -08
TDF : 6HIJ	-7,079 ^e -03	3,063 ^e -03	-2,311	0,0208
TDF : 6KL	-3,076 ^e -03	4,819 ^e -03	-0,638	0,5233
TDF : 6NPQR	-1,104 ^e -02	4,319 ^e -03	-2,555	0,0106
TDF : SAPIN	2,831 ^e -05	8,861 ^e -05	0,317	0,7509

Même si l'effet du sapin n'a pas l'air très significatif, nous allons garder ce modèle pour illustrer nos résultats. Cela permettra de mieux comparer les deux indices.

4.5.6 Facteur influençant l'indice de recrutement

Comme le pourcentage de sapin dans la placette dépend de la région écologique la valeur moyenne ainsi que le premier et le troisième quartile de la répartition du sapin pour chaque région écologique a été calculé (tableau 4.6) :

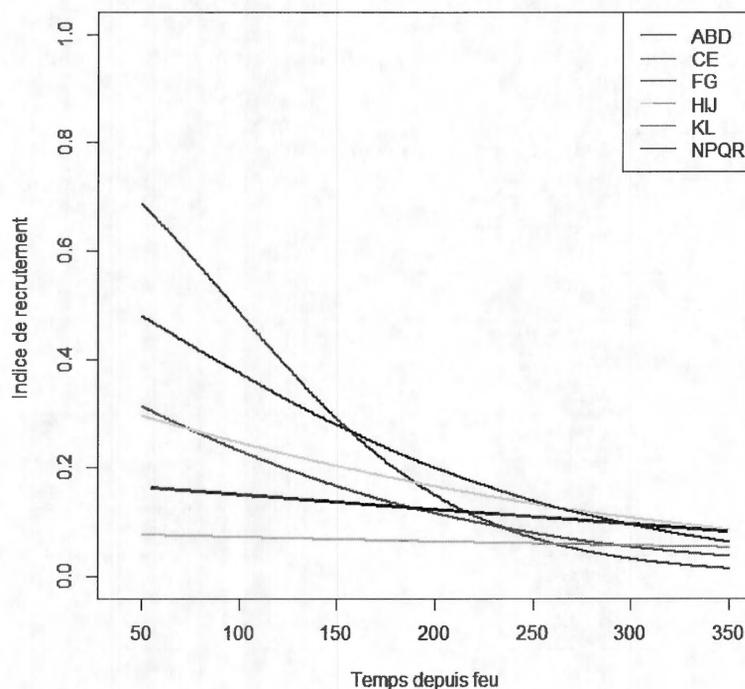


Figure 4.6 : Effet de la région de la région écologique sur l'indice de recrutement. Le temps entre inventaires a été fixé à 35 ans. La moyenne régionale de sapin est également utilisée. Le modèle utilisé est le suivant : Indice de recrutement \sim (temps entre inventaires + temps depuis feu) * (Région écologique + sapin).

De manière générale, plus le temps avance, moins il semble y avoir de recrutement dans les placettes pour les régions CE, HIJ et NPQR. Pour la région FG, le processus de recrutement semble important et rapide. En effet, à 50 ans il y a environ 70% de recrutement et un plateau de recrutement est atteint autour de 225 ans. Ce plateau de recrutement est atteint environ autour de 250 ans pour les régions CE et NPQR et autour de 300 ans pour la région HIJ. Par contre, pour les régions ABD et KL, le phénomène de recrutement est relativement stable, même s'il diminue légèrement au travers du temps.

4.5.7. Synthèse des résultats

Un des objectifs principaux de ce projet est d'observer les caractéristiques de la fenêtre de bris (début, fin, durée). Comme pour la section 3, nous utiliserons l'indice de vieillissement pour déterminer l'âge de début de la fenêtre de bris. Par contre, pour la fin de la fenêtre de bris, nous utiliserons à la fois l'indice de vieillissement et l'indice de recrutement (moyenne des deux). Effectivement, l'effet de plateau de recrutement associé à la dynamique de trouée est plus difficilement observé pour certaines régions écologiques. Pour les régions ABD et KL, nous ne pouvons pas observer le plateau de mortalité/recrutement liée à dynamique de trouée. Nous utiliserons alors que les résultats de l'indice de vieillissement pour caractériser l'âge de fin de la fenêtre de bris (figure 4.7)

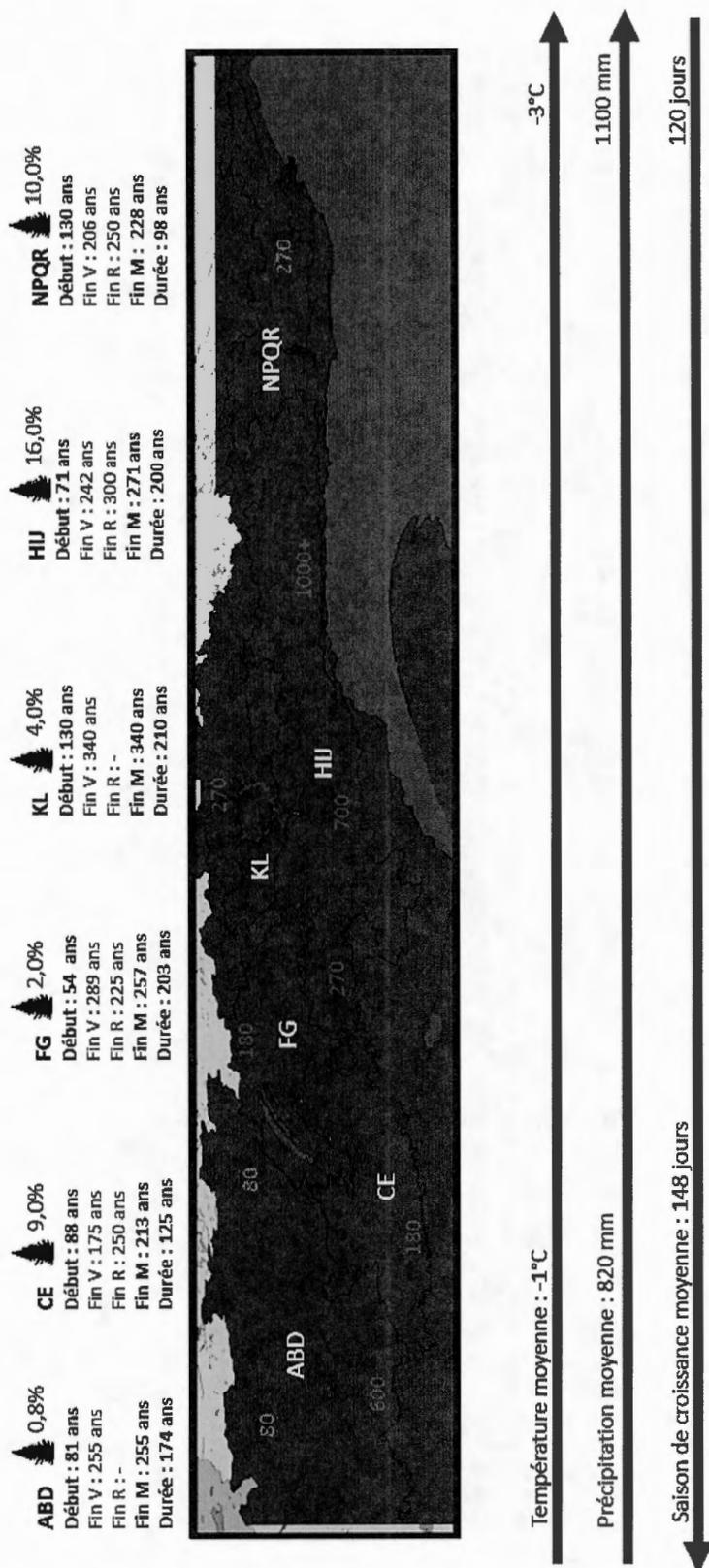


Figure 4.7 : Caractéristique de la fenêtre de bris selon les différentes régions écologiques. Les tendances climatiques sont indiquées sous la carte. Les intervalles moyens de retour de feu sont indiqués en rouge (MRN, 2013). Le pourcentage de sapin moyen par placette est indiqué à la droite des sapins schématisés. Pour chaque regroupement de régions écologiques, l'âge de début, de fin ainsi que la durée de la fenêtre de bris sont inscrits (Fin V correspond à la fin de la fenêtre de bris selon l'indice de vieillissement, Fin R correspond à la fin de la fenêtre de bris selon l'indice de recrutement tandis que Fin M correspond à la moyenne de deux).

4.6. Discussion

L'objectif de cette section était d'observer les caractéristiques de la fenêtre de bris pour les différentes régions écologiques. Ces facteurs et leurs effets sur le processus de bris sont résumés au tableau 4.9 et discutés dans les sections suivantes :

Tableau 4.9 : Synthèse des résultats obtenus; effet du pourcentage de sapin, du régime climatique et du cycle de feu sur la fenêtre de bris.

	Hypothèse de départ	Effet sur l'âge de début et de fin de la fenêtre de bris
% de sapin	Plus il y a de sapin dans un peuplement, plus la fenêtre de bris commence et termine tôt	Plus il y a de sapin dans une placette, plus la fenêtre de bris semble commencer tôt et finir tard (pour une région écologique donnée). D'un point de vue de la durée, plus il y a de sapin dans une placette, plus la fenêtre de bris s'étale sur une longue période.
Régime climatique	Un régime climatique avec des températures clémentes, une longue saison de croissance et des précipitations abondantes permettra une fenêtre bris hâtive et rapide	Plus la température est clémente, que la saison de croissance est longue et même si les précipitations y sont moins élevées, plus la fenêtre de bris commencera tôt (en moyenne), mais il n'y a pas d'effet clair sur la fin de la fenêtre de bris
Cycle de feu	Plus le cycle de feu est long, plus la fenêtre de bris commence et termine tard	Plus le cycle de feu est long, plus la fenêtre de bris s'étale sur une longue période. En moyenne, le début et la fin du bris est atteint plus tôt en présence de cycle de feu court à moyen (80 à 180 ans) et plus tard pour des cycles de feu moyen à long (270 ans +).

4.6.1 Effet du sapin

Pour l'indice de vieillissement et de recrutement, le modèle choisi est le suivant : Indice de vieillissement = (temps entre inventaires + ((temps depuis feu) *(région écologique +sapin))). Cela signifie que le pourcentage de sapin dans une placette et la région écologique sont liés aux facteurs temporels en plus d'être interdépendants entre eux (le pourcentage de sapin moyen se distingue d'une région à l'autre). La tendance générale, pour une région écologique donnée, est que plus il y a de sapin dans une placette, plus la fenêtre de bris commence tôt, mais elle se termine plus tard ; la mortalité semble plus étendue et graduelle; au contraire, lorsqu'il y a peu de sapin dans une placette, le bris semble plus brusque (voir figure 4.4). En effet, le début de la fenêtre des bris est atteint plus tard, mais la durée totale est plus courte (la fin de la fenêtre de bris est alors atteinte plus « jeune »). En somme, le phénomène de bris est donc plus rapide lorsqu'il y a moins de sapin dans la placette. Plusieurs aspects pourraient expliquer l'effet du sapin sur la mortalité des arbres au cours du temps. Premièrement, la fenêtre de bris commence plus tôt car le sapin a une espérance de vie plus courte que l'épinette noire. Donc, plus il y a de sapin, plus ceux-ci auront tendance à mourir rapidement que l'épinette noire, ce qui déclenche la fenêtre de bris plus tôt. Aussi, le sapin à une couronne plus « grande » que l'épinette noire, il engendrera alors des trouées plus importantes qu'en peuplement monospécifique d'épinette noire, ce qui déclenchera un pic de mortalité assez brusque (Pham et al. 2004). Deuxièmement, le processus de bris est plus rapide lorsqu'il y a peu de sapin et beaucoup d'épinette noire dans la placette et il est plus graduel lorsqu'il y a plus de sapin et moins d'épinette noire. Cela laisse croire que les épinettes noires meurent de manière plus synchrone, sur un plus court laps de temps en opposition au sapin.

4.6.3 Effet du régime climatique et du cycle de feu

Un des objectifs principaux de ce projet est d'observer les caractéristiques temporelles de la fenêtre de bris dans les différentes régions écologiques. Ces régions ont des caractéristiques climatiques propres (température moyenne, précipitation moyenne et longueur moyenne de la saison de croissance (figure 2.1)) ainsi qu'un pourcentage de sapin unique (tableau 4.7 et 4.10).). L'hypothèse est que les caractéristiques de la fenêtre de bris seront différentes selon les caractéristiques du climat. En observant les résultats avec les données climatiques, nous pouvons constater certaines tendances (il est toutefois important de mentionner que les données du tableau 2.1 sont des moyennes climatiques et qu'il existe donc de la variabilité au point de vue régionale). Il est constaté que le début de la fenêtre de bris pourrait être influencé par le régime climatique. En effet, pour les régions à température plus chaude, à longue saison de croissance et avec moins de précipitation (ABD-CE-FG), la fenêtre de bris commencerait plus tôt. Au contraire, pour les régions à température plus froide, à courtes saisons de croissance et à forte précipitation (HIJ-KL-NPQR), la fenêtre de bris semble commencer plus tard (en moyenne) (gradient ouest-est). Des études ont démontré que l'augmentation de température ferait augmenter la croissance moyenne des arbres (D'Orangeville et al. 2018, Kauppi et al 2014). En extrapolant avec les résultats, nous constatons que la fenêtre de bris commence bien plus tôt pour les régions plus chaudes qui ont aussi moins de précipitation (plus les arbres croissent vite, plus ils ont tendance à mourir vite). Aussi, selon Keeling et Phillips (2007), il est probable que, dans le futur, nous assisterons à une augmentation de la productivité des peuplements liée aux changements climatiques, et ce pour la grande majorité des types de forêts à travers le globe. Les effets du climat sur la productivité (et donc sur la fenêtre de bris) sont assez mitigés, mais on croit que l'augmentation des températures devrait augmenter la productivité des peuplements sauf si les précipitations sont trop faibles.

Par contre, il n'y a pas le climat qui caractérise les différentes régions écologiques. En effet, le cycle de feu est différent d'une région à l'autre, il a tendance à être plus court à l'ouest (entre 80 et 270 ans) et à augmenter graduellement plus on se déplace vers l'est (270 à 1000 ans). Plus le cycle de feu est court (paysage modulé par le feu plutôt que les perturbations secondaires), plus la fenêtre de bris commence tôt. Aussi, plus le cycle de feu est long, plus la fenêtre de bris semble s'étaler sur une grande période. Les pessière à épinette noire sont souvent accompagnées de pin gris à l'ouest (ou le cycle de feu est plus court) et de sapin baumier à l'est (ou le cycle de feu est long). Le pin gris a une espérance de vie très courte (80-130 ans), les peuplements à l'ouest pourraient avoir une fenêtre de bris qui commence et termine plus tôt en moyenne que les peuplements de l'est, où le sapin est plus présent.

5. CONCLUSION GÉNÉRALE

Le but principal de ce projet était d'observer les caractéristiques de la fenêtre de bris sur le territoire de la pessière à mousse dans différents contextes. Les données utilisées proviennent des inventaires forestiers du ministère de la Forêt, de la Faune et des Parcs. Pour le premier objectif nous nous sommes concentrés sur le territoire de la Côte-Nord. En effet, ce territoire est caractérisé par des peuplements courts en hauteur et on considère souvent que ce territoire a tendance à être moins productif que la pessière à mousse de l'ouest du Québec.

Pour le premier objectif, nos peuplements à l'étude sont des peuplements à majorité d'épinettes noires (50 % et plus), parfois accompagnées de sapin baumier (de 0 à 50 %). En utilisant les données des inventaires forestiers du MFFP, et à l'aide de deux indices nous avons mis en évidence que le temps depuis feu et le pourcentage de sapin dans la placette sont des variables influençant significativement l'indice de vieillissement tandis que le temps depuis feu, la censure, l'IQS et le pourcentage de sapin influence l'indice de recrutement. Nos résultats suggèrent que la période de bris est un long processus qui dure un peu plus de 150 ans. De plus, nous remarquons que plus il y a de sapin dans une placette, plus la fenêtre de bris commencerait tôt. Comme la durée de la fenêtre de bris est toujours sensiblement la même, si la fenêtre de bris commence tôt, elle finira tôt aussi. En moyenne, la fenêtre de bris commence autour de 75-100 ans et se termine entre 250-290 ans.

Au deuxième objectif, nous nous sommes concentrés sur des placettes à dépôts glaciaires épais se situant partout sur le territoire de la pessière à mousse pour observer les caractéristiques de la fenêtre de bris. Dans cette section, nous avons ajouté la région écologique comme facteur à l'étude. Le temps entre inventaires, le temps depuis feu, le pourcentage de sapin et la région écologique sont des données pouvant influencer le

phénomène de la fenêtre de bris. Nous avons constaté que plus il y a de sapin dans une placette, plus la fenêtre de bris semble se commencer tôt et finir tard (pour une région écologique donnée). Toutefois, du point de vue de la durée, plus il y a de sapin dans une placette, plus la fenêtre de bris s'étale sur une longue période. Selon la région écologique (climat et cycle de feu) et le pourcentage de sapin, la fenêtre de bris commence, en moyenne entre 54-130 ans pour se terminer entre 230-340 ans.

Peu d'études à notre connaissance se concentrent sur les caractéristiques temporelles de la fenêtre de bris. Nos résultats montrent que l'âge auquel une forêt est considérée comme une vieille forêt est différent selon les caractéristiques du peuplement et sa région écologique. Nos travaux ont montré que la fenêtre de bris est un processus qui se déroule sur une longue période, peu importe la région écologique. Nous croyons que ces connaissances de la pessière à mousse peuvent être utiles et permettre un aménagement écosystémique mieux adapté régionalement. Finalement, il serait très intéressant dans le futur d'améliorer le résultat de nos recherches en ayant accès à un inventaire forestier couvrant une plus longue période de temps.

6. MATÉRIEL SUPPLÉMENTAIRE

MS 1. Position géographique de nos placettes

MS 1.1 : Position géographique des 37 placettes à l'étude du chapitre 1.

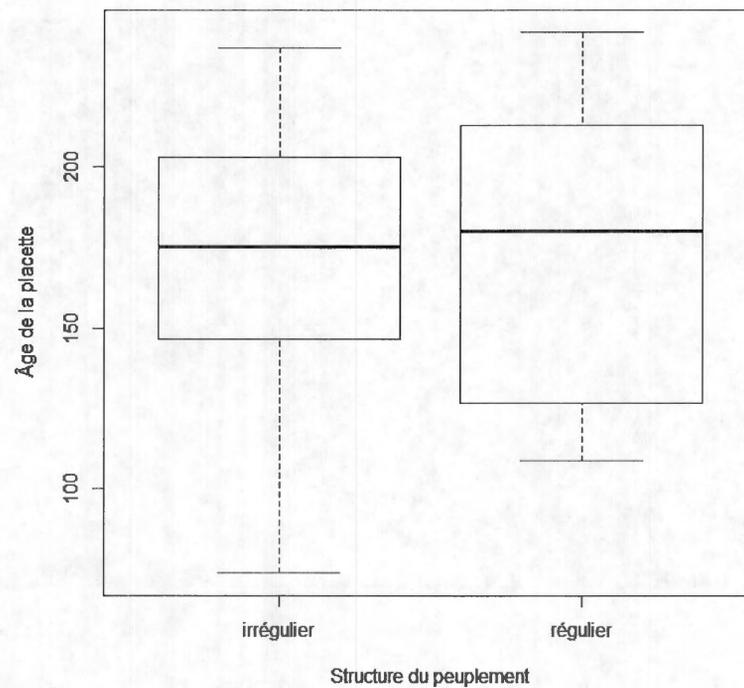


MS 1.2 : Position géographique des 113 placettes à l'étude du chapitre 2



MS 2. Évolution de la structure des peuplements forestiers au cours du temps

Structure du peuplement selon l'âge de la placette pour 98 placettes de retrouvant sur le territoire de la pessière à mousse du Québec. Seules les placettes ayant un âge non censuré ont été utilisées. Structure évaluée au premier inventaire



Nous remarquons que les placettes irrégulières se retrouvent dans une plus grande étendue d'âge que les placettes régulières. Nous croyons que les jeunes placettes irrégulières pourraient avoir fini leurs fenêtres de bris et avoir dominance d'arbres de la cohorte 2 ou encore de la cohorte 3. De ce fait et comme expliqué dans la méthodologie, nous avons décidé de garder que les peuplements réguliers au premier inventaire pour la suite de nos analyses.

MS 3. Détermination du temps écoulé depuis le dernier feu et critères de fiabilité et de censure pour les virées inventoriées par le Ministère (PET et PEP) (adapté de la clé développée par Dominic Cyr)

Critère de fiabilité : seuls les arbres datés en laboratoire seront considérés fiables. Pour être considérée fiable, une virée devra avoir au moins 10 arbres dont l'âge est déterminé en laboratoire. Si du pin gris a été échantillonné, un minimum de 4 pins gris est suffisants

1- Critères de censure :

- 2- En ne considérant que les arbres datés en laboratoire pour l'ensemble de la virée, est-ce qu'un minimum de 60% des arbres échantillonnés appartient à un intervalle de 30 ans (lorsque l'âge < 150 ans) ou 40 ans (lorsque l'âge \geq 150 ans) débutant avec la date d'origine du plus vieil arbre?

Oui : La date du dernier feu correspond à l'âge du plus vieil arbre (donnée non censurée)

Non : 2

- 3- En éliminant les arbres appartenant aux espèces ne s'établissant habituellement pas après un feu (sapin, épinette blanche), est-ce qu'un minimum de 60% des arbres échantillonnés appartient à un intervalle de 30 ans (lorsque l'âge < 150 ans) ou 40 ans (lorsque l'âge \geq 150 ans) débutant avec la date d'origine du plus vieil arbre?

Oui : La date du dernier feu correspond à l'âge du plus vieil arbre (donnée non censurée)

Non : Il s'agit d'un âge minimum défini par l'âge du plus vieil arbre de la première placette (donnée censurée)

MS.4 Regroupement des régions écologiques selon le meilleur modèle statistique

Comme la région écologique a plusieurs niveaux, pour les analyses portant sur chacun de nos indices, nous avons d'abord cherché à procéder à un regroupement de celles-ci sur une base statistique. En effet, en statistique, plus il y a de niveaux à un facteur, plus il y a de chance d'avoir des erreurs de corrélation. Cela signifie que nous avons plus de chance de trouver des « effets significatifs » qui ne le sont pas. Pour contrer ce problème, nous avons aussi appliqué la méthode de Bonferonni qui veut que nous divisions la p-value normalement accepté (0,05), par le nombre de tests à effectuer. Avec 6 groupes, nous avons effectué 15 tests de GLM pairés. La nouvelle p-value sera donc de 0,05/15, soit 0,0033. Par contre, il est important de noter que pour faire des tests de GLM pairés, il fallait d'abord avoir trouvé le meilleur modèle statistique (la meilleure GLM). Nous avons donc, dans un premier lieu, effectué un test d'AICc par modèle biologique pour trouver ce meilleur modèle. Pour l'indice de vieillissement, au seuil de 0,0033, nous avons constaté qu'il n'y avait pas de regroupement possible.

Résultat du test de comparaison pairés pour le modèle statistique : Indice de vieillissement ~ (Temps entre inventaires + ((temps depuis feu)*(% de sapin au premier inventaire + Région écologique))). Pvalue selon la méthode de Bonferroni =0.0033

Pair	Estimation	Erreur standard	Valeur z	Valeur p
CE-ABD	-2.503	0.405	-6.175	<0.001
FG-ABD	0.548	0.433	1.264	0.7980
HIJ-ABD	-1.634	0.367	-4.456	<0.001
KL-ABD	-0.536	1.420	-1.277	0.790
NPQR-ABD	-4.525	1.589	-7.676	<0.001
FG-CE	3.052	0.465	6.552	<0.001
HIJ-CE	0.869	0.374	2.319	0.179
KL-CE	1.967	1.451	4.357	<0.001
NPQR-CE	-2.021	1.567	-3.561	0.046
HIJ-FG	-2.182	0.443	-4.920	<0.001

KL-FG	-1.084	1.483	-2.246	0.201
NPQR-FG	-5.073	1.634	-7.999	<0.001
KL-HIJ	1.097	0.419	-2.616	0.089
NPQR-HIJ	-2.890	0.554	-5.212	<0.001
NPQR-KL	-3.988	0.618	-6.445	<0.001

Résultat des analyses pairées pour la GLM suivante : Indice de recrutement ~ (temps entre inventaires + ((temps depuis feu) * régions écologiques)).

	Estimation	Erreur Standard	Valeur Z	Valeur P
CE - ABD	1.689	0.486	3.476	0.006
FG - ABD	3.643	0.483	7.545	< 0,001
HIJ - ABD	1.436	0.444	3.238	0.014
KL - ABD	-0.422	0.676	-0.625	0.989
NPQR - ABD	2.440	0.569	4.271	< 0,001
FG-CE	1.953	0.438	4.456	< 0,001
HIJ - CE	-0.253	0.389	-0.651	0.986
KL - CE	-2.112	0.649	-3.256	0.013
NPQR- CE	0.751	0.486	1.544	0.624
HIJ - FG	-2.207	0.415	-5.324	< 0,001
KL - FG	-4.065	0.653	-6.223	< 0,001
NPQR - FG	-1.203	0.534	-2.250	0.206
KL - HIJ	-1.858	0.619	-3.001	0.031
NPQR - HIJ	1.004	0.463	2.168	0.243
NPQR - KL	2.862	0.707	4.045	< 0,001

7. BIBLIOGRAPHIE

- Albert-Green A., Dean C.B., Martell D.L. et Woolford D.G. (2003), « A methodology for investigating trends in changes in the timing of the fire season with applications to lightning-caused forest fires in Alberta and Ontario, Canada », *Canadian Journal of Forest Research*, 43(1) : 39-45p.
- Anyomi K.A., Mitchell S.J. et Ruel J.C. (2016), « Windthrow modelling in old-growth and multi-layered boreal forest », *Ecological Modelling*, 327 : 105-114p.
- Archambault L. et Beaulieu J. (1985), « Réduction de croissance en volume occasionnée au sapin baumier, suite à la défoliation par la tordeuse des bourgeons de l'épinette », *The Forestry Chronicle*, 61(1) : 10-13p.
- Archambault L. (1983), « Impact of defoliation caused by the spruce budworm on volume growth in tree fir stand », Environment Canada, Canadian Forestry Service, Laurentian Forest Research Centre, Research Notes 3 : 17-19p.
- Barton A.M. et Keeton W.S. (2018), « Ecology and Recovery of Eastern Old-growth Forests », Washington, Island Press, 370p.
- Baskerville G.L. (1999), « Redevelopment of a Degrading forest », *Ambio*, 17(5) : 314-322p.
- Bélise A.C. (2011), « Régime des feux, dynamique forestière et aménagement de la pessière au nord du Lac-Saint-Jean », Mémoire de maîtrise – Université du Québec à Montréal, 151p.
- Belleau A., Leduc A., Lecomte N. et Bergeron Y. (2011), « Forest succession rate and pathways on different surface deposit types in the boreal forest of northwestern Quebec », *Écoscience*, 18(4) : 329-340p.
- Bergeron Y. et Charron D. (1994), « Postfire stand dynamics in a southern boreal forest (Québec), A dendroecological approach », *Écoscience* 1(2) : 173-184p.
- Bergeron Y., Harvey B.D., Leduc A. et Gauthier S. (1999), « Stratégies d'aménagement forestier qui s'inspirent de la dynamique des perturbations naturelles : considérations à l'échelle du peuplement et de la forêt », *The Forestry Chronicle*, 75(1) : 55-56p.
- Bergeron Y., Gauthier S., Kafka V., Lefort P. et Lesieur D. (2001), « Natural fire frequency for the eastern Canadian boreal forest: consequence for sustainable forestry », *Canadian Journal of Forest Research*, 31 : 384-391p.
- Bergeron Y., Flannigan M., Gauthier S., Leduc A. et Lefort P. (2004), « Past, Current and Future Fire Frequency in the Canadian Boreal Forest: Implications for Sustainable Forest Management », *Ambio*, 33(6) : 356-360p.
- Bergeron Y. et Fenton N. (2012), « Boreal Forest of eastern Canada revisited: old growth, nonfire disturbances, forest succession, and biodiversity », *Botanique* 90(6) : 509-523p.

- Bergeron Y. et Gauthier S. (2016), « Fire regimes: Spatial and temporal Variability and their effects on forests », *Forests: Special Issues*, 424p.
- Bond W.J., Woodward F.I. et Midgley G.F. (2005), « The global distribution of ecosystems in a world without fire », *New Phytologist*, 165(2) : 25-537p.
- Bouchard M., Kneeshaw D. et Bergeron Y. (2007), « Ecosystem management based on large-scale disturbance pulses: A case study from sub-boreal forests of western Quebec (Canada) », *Forest Ecology and Management*, 256(10) : 1734-1742p.
- Bouchard M. and Pothier D. (2010) « Long-term influence of fire and harvesting on boreal forest age structure and forest composition in eastern Québec », *Forest Ecology and Management*, 261(4) : 811-820p.
- Boucher D., De Grandpré L. et Gauthier S. (2003), « Développement d'un outil de classification de la structure des peuplements et comparaison de deux territoires de la pessière à mousses du Québec », *The Forestry Chronicle*, 79(2) : 318-328p.
- Boucher Y., Bouchard M., Grondin P. et Tardif P. (2011), « État de référence de la forêt Québécoise », Ministère des ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, note de recherche forestière no.161, 21p.
- Boulanger Y., Gauthier S., Gray D.R., Le Goff H., Lefort P. et Morissette J. (2013), « Fire regime zonation under current and future climate over eastern Canada », *Ecological Applications*, 23(4) : 904-923p.
- Burnham K.P. et Anderson D.R. (2002), « Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach », *Library of Congress Cataloging-in-Publication Data*, ISBN 978-0-387-95364-9, 488p.
- Burns R.M. et Honkala B.H. (1990), « *Silvics of North America: 1. Conifers* », USDA, Forest Service, Washington DC, 827p.
- Burton P.J., Parisien M.A., Hicke J.A., Hall R.J. et Freeburn J.T. (2008), « Large fires as agents of ecological diversity in the North American boreal forest », *International Journal of Wildland Fire*, 17(6) : 754-767p.
- Carcaillet C., Richard P.J.H., Bergeron Y., Fréchette B. et Ali A.A., 2010, « Resilience of the boreal forest in response to Holocene fire-frequency changes assessed by pollen diversity and population dynamics », *International Journal of Wildland Fire*, 19(8) :1026-1039p.
- Côté M. (1996), « Plan général d'aménagement de la forêt Montmorency de l'Université Laval », Les presses de l'Université Laval, Québec, 160p.

Côté G., Bouchard M., Pothier D. et Gauthier S. (2010), « Linking stand attributes to cartographic information for ecosystem management purposes in the boreal forest of eastern Québec », *The Forestry Chronicle*, 86(4) : 511-519p.

Couillard P-L., Frégeau M., Payette S., Grondin P., Lavoie M. et Laflamme J. (2016), « Dynamique et variabilité naturelle de la pessière à mousses au nord de la région du Lac-Saint-Jean, Québec, Ministère des Forêts, de la faune et des Parcs, Secteur des forêts, Direction des inventaires forestiers, 35p.

Cumming S.G., Burton P.J. et Klinkenberg B. (1996), « Canadian boreal mixedwood forests may have no representative areas: some implications for reserve design », *Ecography* 19: 162-180p.

Cyr D., Gauthier S., Bergeron Y. et Carcaillet C. (2009), « Forest management is driving the eastern North American boreal forest outside its natural range of variability », *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(10) : 519–524p.

De Grandpré L., Pureswaran D., Bouchard M. et Kneeshaw D. (2018), « Climate-induced range shifts in boreal forest pest: ecological, economic, and social consequence », *Canadian Journal of Forest Research*, 48(3) : v–vi

Direction des inventaires forestiers (2009) « Normes des cartes écoforestières – Troisième inventaire forestier », Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Bibliothèque et Archives nationales du Québec 2016, ISBN : 978-2-550-54985-7

Direction des inventaires forestiers (2016) « Normes d'inventaire écoforestier – Placette-échantillons permanente », Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Bibliothèque et Archives nationales du Québec 2016, ISBN : 978-2-550-72899-3

D'Orangeville L., Maxwell J., Kneeshaw D., Pederson N. et Duchesne L. (2018), « Timing and local climate regulate temperate forest sensitivity to drought », *Global Change Biology*, 24 : 2339-2351p.

Drapeau P. et Imbeau L. (2004), « Conséquences et risques potentiels inhérents à la récolte des forêts résiduelles laissées depuis 1998 au sein de grands parterres de coupe pour la faune associée aux forêts matures », avis scientifique présenté à la Direction de l'aménagement de la faune en Abitibi-Témiscamingue ; Ministère des Ressources naturelle et de la Faune, avril 2006

Essen P.-A., Ehnström B., Ericson L. et Sjöberg K. (1997), « Boreal forests », *Ecological Bulletin*, 46 : 16-47p.

Fall A., Fortin M.J., Kneeshaw D., Yamasaki S.H., Messier C., Bouthillier L. et Smyth C. (2004), « Consequences of various landscape-scale ecosystem management strategies and fire cycles on age-class structure and harvest in boreal forests », *Canadian Journal of Forestry*, 34 : 310-322p.

Flannigan M., Cantin A.S., De Groot W.J., Wotton M., Newbery A. et Gowman L.M. (2013), « Global wildland fire season severity in the 21st century », *Forest Ecology and Management*, 294 : 54-61p.

Franklin J.F. (1989), « Importance and justification of long-term studies in ecology ». In G.E. Likens, *Long-term Studies in Ecology*, Springer-Verlag, New York, 3-19p.

Galipeau C., Kneeshaw D. et Bergeron Y. (1997), « White spruce and balsam fir colonization of a site in the southeastern boreal forest as observed 68 year after fire », *Canadian Journal of Forest Research*, 27 : 139-147p.

Gauthier S., Leduc A. et Bergeron Y. (1996), « Forest dynamics modelling under a natural fire cycle: A tool to define nature mosaic diversity in forest management », *Environmental Monitoring and Assessment*, 39 (1-3) : 417-434p.

Gauthier S., Leduc A., Harvey B.D., Bergeron Y. et Drapeau P. (2001), « Les perturbations naturelles et la diversité écosystémique », *Le Naturaliste Canadien*, 125(3) : 10-17p.

Gauthier S., Vaillancourt M.A., Leduc A., De Grandpré L., Kneeshaw D., Morin H., Drapeau P. et Bergeron Y. (2008), « Aménagement écosystémique en forêt boréale », *Presse de l'Université du Québec*, D1525, ISBN 978-2-7605-1525-3, 600 p.

Gauthier S., Boucher D., Morissette J. et De Grandpré L. (2010), « Fifty-seven years of composition change in the eastern boreal forest of Canada », *Journal of Vegetation Science*, 21(4) : 772-785p.

Ghent A.W. (1958). « Studies of Regeneration in Forest Stands Devastated by the Spruce Budworm—II. Age, Height growth, and Related Studies of balsam Fir Seedling », *Forest Science*, 4(2) : 135-149p.

Girard F., Beaudet M., Mailly D. et Messier C. (2014), « Integrating climatic response in competition dependent tree-level growth models for northern hardwoods », *Forest Ecology and Management*, 323(1) : 138-147p.

Glossaire Forestier (2016), « Glossaire Forestier », Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, récupéré de <http://glossaire-forestier.mffp.gouv.qc.ca/>

Gouvernement du Québec, « Loi A-18.1 sur l'aménagement durable du territoire forestier », adoptée en avril 2013, récupéré de <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cs/A-18.1>

Gouvernement du Québec (2017), « L'aménagement écosystémique des forêts ; plus proche de la nature », Ministère de la Forêt, de la Faune et des Parcs, récupéré de <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/amenagement/depliant-ecosystemique.pdf>

Harper K., Boudreault C., De Grandpré L., Drapeau P., Gauthier S. et Bergeron Y. (2003), « Structure, composition, and diversity of old-growth black spruce boreal forest of the Clay Belt region in Quebec and Ontario », *Environmental Reviews*, 11(s1) : S79-S98p.

Jain P., Wang X. et Flannigan M.D. (2017), « Trend analysis of fire season length and extreme fire weather in North America between 1979 and 2015 », *International Journal of Wildland Fire*, 26(12) : 1009-1020p.

Johnson E.A. (1992), « Fire and vegetation dynamics: studies from the North American forest boreal », Cambridge University press, Cambridge, United Kingdom, ISBN-10: 0521341515, 144p.

Johnson E.A. et Wowchuk D.R. (1993), « Wildfire in the southern Canadian Rocky Mountain and their relationship to mid-tropospheric anomalies », *Canadien Journal of Forest Research* 23(6) : 1213-1222p.

Kauppi P.E., Posch M. et Pirinen P. (2014), « Large Impacts of Climatic warming on Growth of Boreal Forests since 1960 », *PLOS ONE*, 9(11) : e111340

Keeling H.C. et Philips O.L. (2007), « The global relationship between forest productivity and biomass », *Global Ecology and Biogeography*, 16(5) : 618-631p.

Kneeshaw D. et Burton P.J. (1998), « Assessment of Functional Old-Growth Status : A case Study in the Sub-Boreal Spruce Zone of British Columbia, Canada », *Natural Areas, Journal*, 18(4) : 293- 308p.

Kneeshaw D. et Gauthier S. (2003), « Old growth in the boreal forest: A dynamic perspective at the stand and landscape level », *Environmental Reviews*, 11 : S99-S114p.

Kuuluvaian T., Mäki J., Karjalainen L. et Lehtonen H. (2002), « Tree age distribution in old-growth forest sites in Vienansalo wilderness, eastern Fennoscandia », *Silva Fennica* 36(1) : 169-184p.

Kuuluvainen T. (2009), « Forest Management and Biodiversity Conservation Based on Natural Ecosystem Dynamics in Northern Europe: The Complexity Challenge », *Ambio*, 38(6) : 309-315p.

Kuuluvainen T. et Laiho R. (2004), « Long-term forest utilization can decrease forest floor microhabitat diversity: Evidence from boreal Fennoscandia », *Canadian Journal of Forest Research*, 34(2) : 303-309p.

Lafèche V., Bernier S., Saucier J.P. et Gagné C. (2013), « Indices de qualité de station des principales essences commerciales en fonction des types écologiques du Québec méridional », Ministère des Ressources naturelles, Direction des inventaires forestiers, 115p.

Lecomte N. et Bergeron Y. (2005), « Successional pathways on different surficial deposits in the coniferous boreal forest of the Quebec Clay Belt », *Canadian Journal of Forest Research*, 35(8) : 1984-1995p.

Logan J.A., Régnière J. et Powell J.A. (2003), « Assessing the impacts of global warming of forest pest dynamics », *The Ecological Society of America, Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(3) : 130-137p.

MacLean D.A. (1980), « Vulnerability of fir-spruce stands during uncontrolled spruce budworm outbreaks: a review and discussion », *The Forestry Chronicle*, 56(5) : 213-221p.

Morin H. et Laprise D. (1990), « Histoire récente des épidémies de la Tordeuse des bourgeons de l'épinette au nord du lac Saint-Jean (Québec): une analyse dendrochronologie », *Canadian Journal of Forest Research*, 20(1) : 1-8p.

Morin H. (1998), « Importance and evolution of spruce budworm outbreaks in Eastern Canada: The contribution of dendrochronology », *Géographie, Physique et Quaternaire*, 52(2) : 237-244p.

McCarthy J. (2001), « Gap dynamics of forest: A review with particular attention to boreal forests », *Environmental Reviews*, 9(1) : 1-59p.

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (2005) « Guide de reconnaissance des types écologiques », Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de l'environnement forestier, récupéré de <https://mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/guide-types-ecologiques.jsp>

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (2008) « L'aménagement durable en forêt boréale : une réponse concrète aux défis environnementaux », Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de l'environnement forestier, 56p.

Ministère des Ressources naturelles du Québec, (2013) « Rapport du Comité scientifique chargé d'examiner la limite nordique des forêts attribuables », Ministère des Ressources naturelles du Québec, Rapport du Comité scientifique chargé d'examiner la limite nordique des forêts attribuables, Secteur des forêts, 148p. + 6 annexes.

Norby R. J et al. (2005), « Forest response to elevated CO₂ is conserved across a broad range of productivity », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(50) : 18052-18056p.

Nguyen-Xuan T. et Bergeron Y. (2000), « Développement d'une stratégie d'aménagement forestier s'inspirant de la dynamique des perturbations naturelles pour la région Nord de l'Abitibi », Rapport final Chaire AFD présenté au Ministère des Ressources naturelles du Québec, 13p. + 2 annexes

Old-Growth Definition Task group (1986), « Interim definitions for old-growth Douglas-fir and mixed-conifer forests in the Pacific Northwest and California, Research Note PNW-447, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Portland, Ore.

Oliver C.D. et Larson B.C. (1990), « Forest Stand Dynamics », New York, N.Y. : McGraw-Hill, Inc.

Pesklevits A., Duinker P. et Bush P. (2011), « Old-growth Forests: Anatomy of a Wicked Problem », *Forest*, 2(1) : 343-356p.

Pham A.T., De Granpré L., Gauthier S. et Bergeron Y. (2004), « Gap dynamics and replacement patterns in gaps of the northeastern boreal forest of Quebec », *Canadian Journal of Forest Research*, 34 : 353-364p.

Robitaille A. et Saucier J.P. (1998), « Paysages régionaux du Québec méridional », Direction de la gestion des stocks forestiers et la Direction des relations publiques du Ministère des Ressources naturelles du Québec, Publication du Québec, ISBN 2551177375, 213p.

Ryan M.G., Binkley D. et Fownes J.H. (1997), « Age-related decline in Forest Productivity: Pattern and Process », *Advances in Ecological Research*, 27 : 213-262p.

Seymour R.S. et Hunter M.L.Jr. (1999), « Principles of ecological forestry: Maintaining biodiversity in forest ecosystems », Cambridge University Press. Cambridge, UK, 22-61p.

Seymour R.S. et Hunter M.L.Jr. (1992), « New forestry in Eastern Spruce-fir forest: Principles and Applications to Maine », Miscellaneous publications, Maine agricultural and Forest Experiment Station, 716 : 36p.

Shorohova E., Kneeshaw D., Kuuluvainen T. et Gauthier S. (2011), « Variability and Dynamics of Old-Growth Forests in the Circumboreal Zone: Implications for Conservation, Restoration and Management », *Silva Fennica*, 45(5) : 785-806 p.

Spies T.A. (1997), « Forest stand structure, composition, and function », In: Kohm, Franklin A., *Creating a forestry for the 21st century, The science of ecosystem management*, Washington, DC: Island Press, 11-30p.

Spies T.A. et Duncan S.L. (2009), « Old growth in a new world : a Pacific Northwest icon re-examined », Washington, DC : Island Press, 360p.

St-Denis A., Kneeshaw D. et Bergeron Y. (2010), « The role of gaps and tree regeneration in the transition from dense to open black spruce stands », *Forest Ecology et Management*, 259(3) : 469-476p.

Tousignant A. et Bernier P. (2015), « Changement climatique et productivité forestière : une forêt de questions », *Progrès forestier*, Ministère des Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts de, 63 : 2p.

Viereck L.A., Dyrness K. et Can Cleve M.J. (1983), « vegetation, soils, and forest productivity on selected forest types in interior Alaska », *Canadian Journal of Forest Research*, 13 : 703-720p.

Waldron K., Ruel J.-C., Gauthier S., De Grandpré L. et Peterson C.J. (2013), « Effects of post-windthrow salvage logging on microsites, plant composition and regeneration », *Applied Vegetation Science*, 17 : 323-337p.

Westerling A.L., Hidalgo H.G., Cayan D.R. et Swetnam T.W. (2006), « Warming and earlier spring increases in western U.S. Forest Wildfire Activity », *Science*, 313(5789) : 940-943p.

Wirth C., Gleixner G. et Heimann M. (2009), « Old Growth Forest: Function, Fate and Value », *Ecological Studies*, 207 : 491p.

Zackrisson O., (1977), « Influence of forest fires on north Swedish boreal forest », *Oikos*, 29(1), 22-32p.