

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

TRANSFORMATION DE LA COMPOSITION DE LA FORÊT DE LA  
PÉNINSULE GASPÉSIENNE AU COURS DU XX<sup>E</sup> SIÈCLE

THÈSE  
PRÉSENTÉE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DU DOCTORAT EN BIOLOGIE  
EXTENSIONNÉ DE  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PAR  
© GABRIEL FORTIN

JANVIER 2018

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse 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.10-2015). 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.»

*« I study history not to  
understand how people were in the  
past, but rather why we are the way we  
are now »*

(Dolly Jørgensen)



## REMERCIEMENTS

Premièrement, je dois mentionner que cette thèse a été financée par le FRQNT, la Chaire de Recherche sur la Forêt Habitée et le groupe Boréas.

Je remercie mon directeur de recherche, Dominique Arseneault, pour m'avoir dirigé patiemment dans mes études graduées. Il m'a toujours laissé la liberté que je souhaitais tout en me donnant ses conseils et idées originales lorsque nécessaire.

Je remercie spécialement Sébastien Dupuis qui m'a amicalement accueilli dans le laboratoire. Il m'a tout appris de l'utilisation des données d'archives et du brassage de bière. Ses cafés sourires, son groove et ses tirs de frisbee m'ont permis de traverser ces longues heures de déchiffrage de carnets et de saisies de données.

Les multiples générations de collègues et amis qui se sont succédé dans le laboratoire méritent aussi un grand remerciement. Je pense à André, Raphaële, Fabio, Tasneem, Victor, Louis, Marie, Olivier, Éric, Benjamin, Sophia, Marie-Ève, Patrick, et bien d'autres.

Finalement, Marilène qui me supporte depuis toutes ces années. Merci infiniment.



## RÉSUMÉ

Au cours des derniers 200 ans, la population humaine mondiale a augmenté exponentiellement ainsi que l'exploitation des ressources naturelles et l'aménagement du territoire. Ces activités anthropiques transforment les biomes, en modifiant les régimes de perturbations et les communautés biologiques, marquant le début de l'Anthropocène. Il est important de documenter ces événements et de comprendre leurs conséquences, tant pour des raisons fondamentales qu'appliquées. En ce sens, l'écologie historique est une discipline qui offre des approches robustes pour comprendre les écosystèmes passés et leurs transformations.

Le but de cette thèse a été de reconstituer la composition forestière préindustrielle d'une région de forêts tempérée et boréale dans l'est de l'Amérique du Nord, de documenter les changements de composition et de comprendre les causes de ces changements. La région d'étude est la péninsule gaspésienne, une région montagneuse située dans l'est du Québec à la transition entre les écozones des forêts tempérée et boréale. Une base de données décrivant la composition forestière préindustrielle a été construite à partir des observations notées par les premiers arpenteurs qui ont exploré, mesuré et divisé le territoire. Cette base de données a été analysée suivant trois approches, soit 1- une évaluation méthodologique de la validité et de la robustesse des données, 2- une reconstitution de la composition forestière préindustrielle à grande échelle spatiale et 3- une reconstitution de la composition préindustrielle à fine échelle spatiale en plusieurs périodes temporelles, formant ainsi respectivement les trois principaux chapitres de la thèse.

Différents types de données d'archives d'arpentage peuvent être utilisés pour décrire la forêt préindustrielle, mais la représentativité et la robustesse de ces données sont encore peu documentées. Le but du premier chapitre a été d'évaluer la qualité des observations des arpenteurs et des reconstitutions de composition forestière résultantes. Dans la péninsule gaspésienne, les types de données décrivant la composition préindustrielle proviennent de deux types d'arpentage, soit l'arpentage des rivières (6180 observations) et l'arpentage des cantons (17 275 observations). Dans les deux cas, nous avons analysé des données d'observations linéaires de peuplements ( $n = 19\,787$ ) et des arbres témoins ( $n = 3668$ ). Les données ont été analysées séparément pour les écozones de forêts boréale et tempérée. Les résultats montrent que les reconstitutions obtenues avec l'arpentage des cantons sont plus représentatives de l'ensemble de la région qu'avec l'arpentage des rivières, car un plus grand nombre de données est disponible et l'ensemble du gradient altitudinal est mieux échantillonné, tandis que l'arpentage de rivières est biaisé en faveur des basses altitudes. Les fréquences des taxons des arbres témoins se comparent aux valeurs de dominances dérivées des observations linéaires. La forêt préindustrielle de l'écozone boréale était composée surtout de sapin baumier, d'épinettes et de bouleau à papier, tandis que celle de

## VIII

l'écozone tempérée comprenait, en plus des taxons boréaux, le thuya occidental, le bouleau jaune, les pins et les érables. Comparativement à la forêt actuelle, décrite à partir des placettes échantillons des inventaires forestiers modernes (1976-2008; n = 27 521), on constate que des changements de composition plus importants sont survenus dans la forêt tempérée que dans la forêt boréale. Le bouleau à papier, les peupliers et les érables sont les taxons qui ont le plus augmenté, au détriment du thuya occidental, des pins et du bouleau jaune.

Ces changements de composition sont potentiellement la conséquence des perturbations anthropiques et des changements climatiques, mais la contribution relative de chaque facteur demeure mal comprise. Plusieurs perturbations anthropiques (colonisation, feux anthropiques et pratiques forestières) ont affecté la Gaspésie au cours du dernier siècle tandis que la température est demeurée stable. Le but du deuxième chapitre a été d'étudier l'impact des perturbations anthropiques dans un contexte de climat régionalement stable. À partir de cartes historiques, les perturbations anthropiques du XX<sup>e</sup> siècle (incendies et coupes) ont été reconstituées. La distribution spatiale et altitudinale des taxons ont été mesurées et comparées entre la période préindustrielle et moderne. Les résultats indiquent que les changements de composition sont spatialement associés aux perturbations du XX<sup>e</sup> siècle, tandis que la distribution spatiale et la limite altitudinale sont demeurées stables pour tous les taxons. Nous concluons que les perturbations anthropiques du XX<sup>e</sup> siècle ont été à elles seules suffisantes pour causer d'importants changements de composition dans la forêt tempérée.

Dans le troisième chapitre, la chronologie des changements de composition forestière des derniers 200 ans a été documentée en utilisant plusieurs jeux de données décrivant la composition forestière d'une même région (1400 km<sup>2</sup>) à différentes époques. Trois premiers jeux de données proviennent des archives d'arpentage primitif (1830-1869, 1880-1899, 1900-1962; n = 6493 observations) alors que les quatre derniers proviennent des placettes échantillons des quatre inventaires forestiers décennaux du gouvernement du Québec (1976, 1987, 1998-2005, 2008; n = 1502). Les résultats démontrent que l'utilisation de plusieurs jeux de données permet de documenter des tendances temporelles de changements de composition. La fréquence d'occurrence des pins a chuté subitement au début du XX<sup>e</sup> siècle, celle du bouleau à papier a augmentée progressivement depuis le début de la colonisation, celle des peupliers a augmentée subitement à la suite des grands incendies du XX<sup>e</sup> siècle et celle des érables a augmentée rapidement au milieu du XX<sup>e</sup> siècle. La forêt moderne de la région d'étude est fortement structurée par les incendies du XX<sup>e</sup> siècle.

Mots clés : écologie forestière; écologie historique; écologie des perturbations; archive de l'arpentage primitif; comparaison de base de données; forêt préindustrielle; forêt boréale; forêt tempérée; changement de composition; perturbation anthropique.

## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ .....	vii
TABLE DES MATIÈRES .....	ix
LISTE DES TABLEAUX .....	xiii
LISTE DES FIGURES .....	xv
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES .....	xix
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
ANTHROPOCENE ET CHANGEMENTS GLOBAUX .....	1
COMPRENDRE LES CAUSES DES CHANGEMENTS DE COMPOSITION.....	5
PRECISION DE TERMINOLOGIES EMPLOYEES .....	8
AMENAGEMENT ECOSYSTEMIQUE ET ECOLOGIE HISTORIQUE .....	9
REGION D’ETUDE : ASPECTS BIOGEOGRAPHIQUES .....	13
REGION D’ETUDE : ASPECTS HISTORIQUES.....	17
REGION D’ETUDE : REGIME DE PERTURBATIONS NATURELLES .....	20
CONTEXTES ET OBJECTIFS DE LA THESE.....	22
CHAPITRE I Reconstitution de la composition forestière préindustrielle dans la péninsule gaspésienne à partir des archives de l’arpentage primitifs des cantons et des rivières .....	25
I.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE.....	25
I.2 MULTIPLE EARLY LAND SURVEY DATASETS ACCURATELY DESCRIBE THE PRESETTLEMENT FOREST COMPOSITION IN THE GASPÉ PENINSULA, EASTERN CANADA.....	27
I.2.1 Abstract.....	27
I.2.2 Introduction.....	29

I.2.3	Materials and methods.....	31
I.2.4	Results .....	36
I.2.5	Discussion .....	38
I.2.6	Acknowledgements .....	42
I.2.7	References .....	43
I.2.8	Tables .....	53
I.2.9	Figures .....	54
I.2.10	Appendix .....	61
CHAPITRE II Transformation de la forêt préindustrielle de la péninsule gaspésienne, est du Canada : Impact des perturbations anthropiques en l'absence de réchauffement climatique .....		65
II.1	RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE .....	65
II.2	TRANSFORMATION OF THE PRESETTLEMENT FOREST COMPOSITION IN THE GASPÉ PENINSULA, EASTERN CANADA: IMPACTS OF ANTHROPOGENIC DISTURBANCES IN ABSENCE OF WARMING TREND .....	67
II.2.1	Abstract .....	67
II.2.2	Introduction .....	68
II.2.3	Materials and methods.....	70
II.2.4	Results .....	76
II.2.5	Discussion .....	79
II.2.6	Acknowledgements .....	84
II.2.7	References .....	85
II.2.8	Tables .....	94
II.2.9	Figures .....	96
II.2.10	Appendix .....	104
CHAPITRE III Analyse à haute résolution temporelle des changements de composition forestières dans le sud de la péninsule gaspésienne (1830-2010) .....		109
III.1	RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU TROISIÈME ARTICLE .....	109

ANALYSE À HAUTE RÉOLUTION TEMPORELLE DES CHANGEMENTS DE  
 COMPOSITION FORESTIÈRE DANS LE SUD DE LA PÉNINSULE  
 GASPÉSIENNE (1830-2010).....111

III.1.1 Introduction.....111

III.1.2 Méthode .....114

III.1.3 Résultats.....120

III.1.4 Discussion.....122

III.1.5 Remerciements.....128

III.1.6 Références.....129

III.1.7 Tableaux.....139

III.1.8 Figures.....140

III.1.9 Annexe .....145

CONCLUSION GÉNÉRALE.....147

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....153



## LISTE DES TABLEAUX

Table 1-1. Number of available observations per survey type and ecozone. LD: line description; WT: witness trees. Observations subsequent to 1900 and 1940 are excluded from the temperate and boreal datasets, respectively.....	53
Table 1-S1. Terms and expressions found in surveyors' logbooks and correspondence to taxon names and expressions used in this study.....	61
Table 1-S2. Taxa frequency among witness tree observations and for the first four ranking positions of line description observations. Taxa prevalence refers to the frequency of occurrence of taxa among all line description observations regardless of their ranking position.....	64
Table 2-1. Taxa prevalence (% of all observations) for the presettlement and modern time-periods in disturbed and undisturbed sectors.....	94
Table 2-2. Fire burn rate (as % of burned area per year) and fire cycle estimates (in years) according to time-period and persistence of fire events in historic records. The persistence of a fire event is the presumed duration of the time-period during which surveyors recorded the occurrence of the most recent fire prior to survey.....	95
Table 2-S5. Detailed number of modern plots where some tree taxa are present or absent, depending on whether the plots is located in a disturbed or undisturbed sector.....	95
Table 3-1. Caractéristiques de paysage dans les secteurs incendiés et non incendiés, décrites selon la fréquence de coupes totales et partielles, la densité de chemins, la défoliation observée lors de la dernière épidémie de TBE, la proportion de peuplements feuillus, mélangés et résineux ainsi que la fréquence d'occurrence des taxons dans les quatre jeux de placettes échantillons.....	139



## LISTE DES FIGURES

<p>Fig. 1-1. Location of the study area in eastern Canada and delineation of the temperate and boreal ecozones. Forest zones in the top left inset are from the Canadian forest classification system (Rowe 1972). The balsam fir-yellow birch (<i>i.e.</i> the temperate ecozone) and the balsam fir-white birch bioclimatic domain (boreal ecozone) are from the Québec forest classification system (Robitaille and Saucier 1998).....</p>	54
<p>Fig. 1-2. Total weight of line description and frequency of witness tree observations by survey type (township vs. river) for each ecozone and four time-periods over the last two centuries. The weight of a line description observation corresponds to its spacing from adjacent observations or its length (see method). Weights and frequencies are compiled using a grid of 268 - 10km × 10km cells. The weight is in chains, which is the unit used by the surveyors (1 chain = 20.12m). For the temperate ecozone, data before 1900 (the first two columns) were retained for analysis; for the boreal ecozone, data before 1940 (the first three columns) were retained for analysis. Data shown in the fourth column were not used in subsequent analysis.....</p>	55
<p>Fig. 1-3. Frequency distributions of the number of taxa listed by surveyors in line description observations along rivers and township lines and comparison with the number of taxa in modern survey plots for the boreal (a, b, c) and temperate ecozones (d, e, f). For each modern plot, we considered either all taxa present (a, d), only taxa composing the first 95% (b, e) or the first 90% (c, f) of the total basal area, beginning with the most dominant taxon.....</p>	56
<p>Fig. 1-4. Frequency distributions of line description and modern data by elevation classes, per survey types (river vs. township) in the temperate ecozone (a) and in the boreal ecozone (b). The gray shape in the background indicates the frequency distributions of the elevation classes across the study area .....</p>	57
<p>Fig. 1-5. Comparison of taxa importance between the river and township survey, using indices of taxa prevalence (a), taxa dominance (b), and witness tree frequency (c). Abb: <i>Abies balsamea</i>; Pic: <i>Picea</i> spp.; Tho: <i>Thuja occidentalis</i>; Pin: <i>Pinus</i> spp.;</p>	

Lal: <i>Larix laricina</i> ; Bep: <i>Betula papyrifera</i> ; Bea: <i>Betula alleghaniensis</i> ; Pop: <i>Populus</i> spp.; Ace: <i>Acer</i> spp.; Oth: Other .....	58
Fig. 1-6. Comparison of taxa prevalence (a, c) and dominance (b, d) between line description and witness tree observations for the temperate and boreal ecozones. Taxa abbreviations are given in Fig 1-5.....	59
Fig. 1-7. Comparison of taxa prevalence (a, b) and dominance (c, d) between line descriptions and modern plots. Taxon abbreviations are given in Fig 1-5 .....	60
Fig. 2-1. Location of the study area in eastern North America and location of the surveyors' observation .....	96
Fig. 2-2. Trends in annual minimum temperature (a), mean temperature (b) and maximum temperature (c) over the last 100 years for 10 groups of meteorological station across the study area. Triangles pointing up indicate positive trend while those pointing down indicate negative trend. Black triangles indicate a statistically significant trend (nonparametric Mann-Kendall trend test, $\alpha = 0.05$ ) while gray ones indicate a non-significant trend. The size of the triangles is proportional to the magnitude of the trend. Circles indicate trend near zero.....	97
Fig. 2-3. Taxa prevalence by elevation classes for the presettlement and present-day time-periods.....	98
Fig. 2-4. Modern species prevalence by elevation classes for species grouped into the spruces, poplars and maples taxa .....	99
Fig. 2-5. Tree taxa prevalence across the study region for the presettlement and present-day time-periods, using a grid of 10km $\times$ 10km cells. The prevalence difference is computed from the present-day minus the presettlement values such that positive values (in red) indicate an increase while negative values (in blue) refer to a decrease as compared to presettlement times. The bar diagrams to the right indicate the number of cells within each class of prevalence change and the vertical gray bar indicates differences of less than 10%. The bold line separates the temperate and boreal ecozones .....	100
Fig. 2-6. Present-day prevalence across the study region for species grouped into the spruces, poplars and maples taxa. The color legend is the same as in the Fig. 2-5 .....	101

Fig. 2-7. RDA ordination graph for the presettlement taxa prevalence correlated to the environmental and disturbance variables. The solid and dashed ellipses enclose 95% of all observations for the temperate and boreal ecozone, respectively. Abb: *Abies balsamea*; Pic: *Picea* spp.; Tho: *Thuja occidentalis*; Pin: *Pinus* spp.; Lal: *Larix laricina*; Bep: *Betula papyrifera*; Bea: *Betula alleghaniensis*; Pop: *Populus* spp.; Ace: *Acer* spp. The numbers in parenthesis indicate the proportion of unconstrained and constrained explained by the axis, respectively ..... 102

Fig. 2-8. RDA ordination of present-day taxa prevalence correlated to the environmental and disturbance variables, using A) the first and second ordination axe, B) the first and third ordination axe and C) the second and third ordination axe. The solid and dashed ellipses enclose 95% of all observations for the temperate and boreal ecozone, respectively. Abb: *Abies balsamea*; Pig: *Picea glauca*; Pim: *Picea mariana*; Pir: *Picea rubens*; Tho: *Thuja occidentalis*; Lal: *Larix laricina*; Bep: *Betula papyrifera*; Bea: *Betula alleghaniensis*; Pob: *Populus balsamifera*; Pot: *Populus termuloides*; Acr: *Acer rubrum*; Acs: *Acer saccharum*. The numbers in parenthesis indicate the proportion of unconstrained and constrained explained by the axis, respectively ..... 103

Fig. 2-S1. Trends in monthly mean temperature over the last 100 years for 10 groups of meteorological station across the study area. Triangles pointing up indicate positive trend while those pointing down indicate negative trend. Black triangles refer to a statistically significant trend (nonparametric Mann-Kendall trend test,  $\alpha = 0.05$ ) while gray ones refer to a non-significant trend. Triangle's size is proportional to the magnitude of the corresponding trend. Circles indicate trend near zero ..... 104

Fig. 2-S2. Trends in monthly total precipitation over the last 100 years for 10 groups of meteorological station across the study area. Triangles pointing up indicate a positive trend while those pointing down indicate a negative trend. Black triangles refer to a statistically significant trend (nonparametric Mann-Kendall trend test,  $\alpha = 0.05$ ) while gray ones refer to a non-significant trend. Triangle's sizes is proportional to the magnitude of the corresponding trend. Circles indicate trend near zero ..... 105

Fig. 2-S3. 20th century fire polygons, reconstructed from historical maps (1927-1928 and 1938), MFFP (2017) data as well as from the fire mentions in the surveyors' logbook ..... 106

Fig. 2-S4. Recent (1960s-2004) forest management activities, including clear and partial cutting, commercial and pre-commercial thinning and plantation, according to

forest maps of the four forest inventories conducted by the Government of Québec (MFFP 2015).....	107
Fig. 3-1. Aire d'étude située au sud de la péninsule gaspésienne (a) et localisation des sept jeux de données utilisés dans les analyses (b à h). Pour les trois premiers jeux de données (b, c et d), chaque ligne représente une observation d'arpenteur. Pour les quatre derniers jeux de données (e, f, g et h), chaque point représente une placette d'inventaire forestier .....	140
Fig. 3-2. Fréquence d'occurrence (ligne pleine) et fréquence au premier rang (ligne pointillée) des principaux taxons dans les sept jeux de données. Pour les fréquences d'occurrence, l'intervalle de confiance à 95 % est indiqué par les barres d'erreurs.....	141
Fig. 3-3. Fréquence d'occurrence des principaux taxons dans les jeux de données, sur une grille de 186 cellules de 9 km <sup>2</sup> . Les trois premières colonnes montrent les fréquences dans les trois jeux de données d'archive d'arpentage. La quatrième colonne montre la fréquence dans les quatre jeux de données de placettes d'inventaire forestier combinés. La limite de l'incendie de 1924 est indiquée sur les cartes du XX <sup>e</sup> siècle.....	142
Fig. 3-4. Distribution spatiale de la fréquence des mentions de perturbations dans les trois jeux de données des arpenteurs, dans une grille de 186 cellules de 9 km <sup>2</sup> (3 × 3 km). .....	143
Fig. 3-5. Perturbations récentes reconstituées. A) Incendies forestiers des décennies 1890 à 1960. B) Coupes totales et partielles des décennies 1960 à 2000. C) Secteurs agricoles et urbains ainsi que le réseau routier photo-interprété lors du dernier inventaire forestier (2004). D) Indice de défoliation de la dernière épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette (1972-1992), les valeurs plus élevées indiquent davantage de défoliation que des valeurs faibles. Le tracé noir superposé sur les cartes délimite la région d'étude.....	144
Fig. 3-S1. Plan du canton Cox dessiné par MacDonald (1836) et agrandissement de la section nord-ouest du canton où un incendie forestier a été noté ( <i>Burnt land</i> ) ainsi que ses limites approximatives. Les limites de cet incendie sont confirmées et notées plus précisément dans le carnet d'arpentage.....	145

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

<b>Abb</b>	<i>Abies balsamea</i>
<b>Ace</b>	<i>Acer</i> spp.
<b>Acr</b>	<i>Acer rubrum</i>
<b>Acs</b>	<i>Acer saccharum</i>
<b>BAEQ</b>	Bureau d'aménagement de l'est du Québec
<b>Bea</b>	<i>Betula alleghaniensis</i>
<b>Bep</b>	<i>Betula papyrifera</i>
<b>BP</b>	<i>Before present</i>
<b>DBH</b>	Diameter at breast height
<b>DHP</b>	Diamètre à hauteur de poitrine
<b>FRQNT</b>	Fonds de Recherche du Québec - Nature et Technologies
<b>HRV</b>	Historical range of variability
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>IUCN</b>	International Union for Conservation of Nature
<b>Lal</b>	<i>Larix laricina</i>
<b>LD</b>	Line description
<b>MFFP</b>	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs

XX

<b>MRNF</b>	Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune
<b>NOAA</b>	National Oceanic and Atmospheric Administration
<b>Pmp</b>	Pied mesure de planche
<b>Ppm</b>	Partie par million
<b>Pic</b>	<i>Picea</i> spp.
<b>Pig</b>	<i>Picea glauca</i>
<b>Pim</b>	<i>Picea mariana</i>
<b>Pin</b>	<i>Pinus</i> spp.
<b>Pir</b>	<i>Picea rubens</i>
<b>Pob</b>	<i>Populus balsamifera</i>
<b>Pop</b>	<i>Populus</i> spp.
<b>Pot</b>	<i>Populus termuloides</i>
<b>RDA</b>	Redundancy analysis
<b>SOPFIM</b>	Société de protection des forêts contre les insectes et maladies
<b>TBE</b>	Tordeuse des bourgeons de l'épinette
<b>THO</b>	<i>Thuja occidentalis</i>
<b>UQAR</b>	Université du Québec à Rimouski
<b>WT</b>	Witness tree

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### ANTHROPOCENE ET CHANGEMENTS GLOBAUX

La population humaine mondiale est en croissance exponentielle et les moyens technologiques disponibles permettent des activités anthropiques de plus en plus importantes. (Houghton 1994, Vitousek 1994, Vitousek *et al.* 1997, Clark 2001, Crutzen et Steffen 2003, Ellis *et al.* 2010). L'aménagement du territoire et l'exploitation des ressources naturelles se sont accrus au point où on nomme l'ère géologique actuelle « Anthropocène » (Crutzen 2000, Crutzen et Steffen 2003). L'Anthropocène est observable via plusieurs indicateurs, tels l'effectif de la population humaine mondiale, la quantité d'eau consommée, la quantité de combustibles fossiles extraits, etc. qui montrent une augmentation exponentielle de la pression anthropique sur les écosystèmes à l'échelle globale. Cette pression a plusieurs conséquences directes mesurables, telles la hausse de concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique, la quantité de territoires déforestés, etc. Ces transformations ont à leur tour plusieurs conséquences sur la dynamique des systèmes à l'échelle globale, telles le changement climatique anthropique, les extinctions d'espèces, les introductions d'espèces exotiques ou encore la fragmentation des habitats naturels. Ces transformations de dynamique des systèmes à l'échelle globale sont généralement regroupées sous le concept de « changements globaux ». Documenter et comprendre ces changements globaux est important, tant pour des raisons fondamentales qu'appliquées.

Un des principaux aspects des changements globaux est le changement climatique d'origine anthropique en cours. Depuis les derniers 200 ans, la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique est passée de 280 à 400 parties par million

(ppm), en raison des activités anthropiques (Santer *et al.* 1996, NOAA 2017). La température moyenne globale a augmenté de 0,6 °C, le taux de changement de température par année entre 1976 et 1996 est le plus élevé du dernier millénaire et 15 des 16 dernières années sont les plus chaudes enregistrées par les instruments de mesure modernes (Mann *et al.* 1998, 1999, IPCC 2013, Brown *et al.* 2016).

Ces changements climatiques ont des conséquences sur les systèmes abiotiques, comme l'augmentation de température atmosphérique ou la modification du régime de précipitation (Forget *et al.* 2003, IPCC 2013). Ces changements de conditions abiotiques ont à leur tour des conséquences sur les communautés écologiques, telles la migration d'espèces sur les gradients latitudinaux (Boisvert-Mars *et al.* 2014) et altitudinaux (Beckage *et al.* 2008). Pour chaque degré Celsius d'augmentation de température moyenne annuelle, une migration pouvant aller jusqu'à environ 145 km de latitude ou 167 m d'altitude des espèces arborescentes est attendue (Jump *et al.* 2009). Des changements de composition des forêts sont prédits particulièrement dans les régions situées à la transition entre les grands biomes (Pastor et Post 1988, Neilson 1993, Goldblum et Rigg 2010, Fisichelli *et al.* 2013).

Les changements climatiques ont aussi des impacts sur les processus écologiques et les régimes de perturbations naturelles, ce qui entraîne encore des conséquences sur les communautés écologiques. Par exemple, les températures plus élevées et les épisodes de sécheresses plus fréquents pourraient provoquer une augmentation de la fréquence des feux en forêt boréale (Boulanger *et al.* 2013, 2014, 2016). Les épidémies d'insectes peuvent être influencées par les changements climatiques, notamment via des modifications dans l'aire de répartition des insectes ravageurs de même que dans la fréquence, la durée ou la sévérité des épidémies (Fleming et Volney 1995, Volney et Fleming 2000). Par exemple, dans le nord-est de l'Amérique du Nord, la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clem.; TBE) pourrait agir différemment comme agent de perturbation sous un climat plus chaud. Cet insecte défolie le sapin baumier (*Abies balsamea* (L)

Mill.) et les épinettes (*Picea* spp. L.). Le sapin baumier et l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) sont qualifiées d'hôtes primaires, tandis que les épinettes noire (*Picea mariana* (Mill) B.S.P.) et rouge (*Picea rubens* Sarg.) sont des hôtes secondaires. Cette spécificité semble être causée par le synchronisme entre la phénologie de débourrement des bourgeons des hôtes primaires et l'éclosion des larves de TBE. Le changement climatique en cours pourrait provoquer un changement de phénologie de telle sorte que l'asynchronisme entre l'éclosion des larves de TBE et le débourrement des bourgeons d'épinette noire serait réduit. Ainsi, certains chercheurs s'attendent à voir la spécificité de la TBE envers l'épinette noire augmenter au cours des prochaines années (Pureswaran *et al.* 2015).

Un autre aspect du changement global est le changement d'affectation des terres, notamment via la progression du front de la colonisation et le défrichement des forêts. En plus de la réduction des superficies forestières au profit de territoires agricoles et urbains, les forêts résiduelles sont plus fragmentées, moins connectées et subissent un effet de bordure accru (Houghton 1994). Ce phénomène d'importance globale est notamment observé en Amérique du Nord, dont au Québec (Whitney 1994, Bouchard et Domon 1997, Foster *et al.* 1998). On doit noter que le phénomène inverse est aussi observé depuis quelques décennies dans certaines régions rurales, notamment en Europe et en Amérique du Nord, où des terres défrichées et cultivées depuis des centaines d'années sont maintenant abandonnées, menant à l'afforestation (Foster et Aber 2004, Fuchs *et al.* 2015).

L'occupation du territoire par les humains s'accompagne généralement d'incendies forestiers, causés accidentellement ou volontairement (Bowman *et al.* 2011). Les incendies volontaires ont souvent été allumés pour faciliter le défrichement de terres, en lien avec la pratique d'agroforesterie sur brûlis, pour faciliter la chasse de gibier ou encore lors de conflits (Blanchet 2003, Bowman *et al.* 2011). Ce phénomène global d'augmentation de la fréquence des incendies forestiers lors de l'occupation du territoire par les humains a été aussi observé dans l'est de

l'Amérique du Nord (Cwynar 1977, Wein et Moore 1977, 1979, Le Groupe Dryade 1986, Blanchet 2003, Dupuis 2009, Terrail 2013; Boucher *et al.* 2014). Au Québec, lors des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles, de nombreux incendies forestiers ont été causés accidentellement par des locomotives, des campeurs et par les feux d'abattis échappés par les colons lors du défrichement des terres (Assemblée législative 1869, Blanchet 2003). Entre 1909 et 1939, les incendies répertoriés ont été allumés à 71,6 % par des humains, 5,7 % par la foudre et 22,8 % étaient de causes inconnues (Service de protection contre les incendies 1906-1939, Dupuis 2009). Au Bas-Saint-Laurent, dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, il a été estimé qu'environ 5 % du territoire brûlait par année, dû principalement à la négligence des colons (Guay 1942). L'augmentation de la fréquence des incendies forestiers modifie la composition et la structure des forêts en causant leur rajeunissement et en augmentant la fréquence des essences pyrophiles au détriment des essences pyrophobes (Cwynar 1977, Carleton et MacLellan 1994, Dupuis 2009, Bouchard et Pothier 2011, Terrail 2013). Le phénomène inverse a aussi été observé, soit une réduction de la fréquence des incendies suivant la colonisation, notamment dans certaines régions des États-Unis. Dans ces régions, les amérindiens précolombiens causaient volontairement des incendies, afin de dégager le territoire pour la culture de maïs, pour l'agroforesterie et pour faciliter la chasse de gibier. Avec la colonisation européenne, ces pratiques ont cessé et les incendies ont été contrôlés (Guyette et Spetich 2003, Friedman et Reich 2005, Sands et Abrams 2011, Hanberry *et al.* 2012, Nowacki et Abrams 2015).

Le changement global s'observe aussi avec la progression et l'intensification des coupes forestières (Whitney 1994, Östlund *et al.* 1997, Foster *et al.* 1998, Johnson et Miyanishi 2012). Tant à l'échelle globale qu'au Québec, de plus en plus de forêts sont exploitées et les forêts jamais exploitées sont de plus en plus rares (Brisson *et al.* 1988, Foreman et Wolke 1992, Nowacki et Trianosky 1993, Bouchard 2005, Johnson et Miyanishi 2012, Boucher *et al.* 2017a). Au Bas-Saint-Laurent, dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, il a été estimé que les essences conifériennes étaient

exploités à 274 % de leur production annuelle et les feuillus à 38 %, et « que si les coupes continuent à se faire au même taux chaque année, la forêt sera épuisée en bois de sciage au bout de 20 ans » (Guay 1942). En comparaison aux forêts sous dynamique naturelle, les forêts aménagées sont généralement plus jeunes, plus fragmentées, présentent une structure interne simplifiée, ont davantage de bordures et sont composées d'une plus forte proportion d'essences opportunistes et à croissance rapide au détriment d'essences longévives et tolérantes à l'ombre (Mladenoff *et al.* 1993, Carleton et MacLellan 1994, Foster *et al.* 1998, Brisson et Bouchard 2003, Boucher *et al.* 2009b, Cyr *et al.* 2009, Bouchard et Pothier 2011, Boucher *et al.* 2011, Boucher et Grondin 2012, Boucher *et al.* 2014).

## COMPRENDRE LES CAUSES DES CHANGEMENTS DE COMPOSITION

Plusieurs études ont documenté des changements de composition forestière dans les forêts tempérées au cours des derniers siècles. Cependant, identifier clairement les causes des changements de composition peut s'avérer complexe, puisque plusieurs agents de changements globaux, dont les changements climatiques, participent en même temps aux changements de composition. Peu d'études ont considéré en même temps les changements climatiques et les perturbations anthropiques (Krankina *et al.* 2005, Gimmi *et al.* 2010, Landhäusser *et al.* 2010, Fisichelli *et al.* 2014, Nowacki et Abrams 2015, Plieninger *et al.* 2016, Strahan *et al.* 2016, Vayreda *et al.* 2016). En plus de participer à la modification du régime de perturbations naturelles, les changements climatiques peuvent avoir des effets synergétiques ou antagonistes avec les perturbations anthropiques (Fleming et Volney 1995, Volney et Fleming 2000, Turner 2010, Krankina *et al.* 2005, Boulanger *et al.* 2013, Kulakowski *et al.* 2013, Boulanger *et al.* 2014, Keane *et al.* 2015, Pureswaran *et al.* 2015, Boulanger *et al.* 2016).

Un exemple illustrant la complexité liée à la compréhension des causes des changements de composition est l'augmentation de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) et de l'érable rouge (*Acer rubrum* L.) dans le nord-est de l'Amérique du Nord. Ces deux espèces ont augmenté en fréquence et en dominance au cours du XX<sup>e</sup> siècle, notamment suivant des perturbations anthropiques (Abrams 1998, Foster *et al.* 1998, Cogbill *et al.* 2002, Brisson et Bouchard 2003, Fei et Steiner 2007, 2009, Dupuis *et al.* 2011). Inversement, le phénomène contraire est documenté, soit le dépérissement des érablières au cours de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle (Payette *et al.* 1996). Ces espèces, surtout l'érable à sucre, sont reconnues comme étant tolérantes à l'ombre et longévives (Harlow *et al.* 1978), et même comme des espèces climaciques (Dansereau 1944, Grandtner 1972, Parker *et al.* 1985). De telles espèces sont théoriquement défavorisées par les grandes perturbations. C'est pourquoi leur augmentation au cours du XX<sup>e</sup> siècle semble paradoxale. Dans les régions situées dans la partie nord de leurs aires de répartition, leur augmentation a été interprétée comme une conséquence du réchauffement climatique du dernier siècle (Tremblay *et al.* 2002, Goldblum et Rigg 2005, Boisvert-Marsh *et al.* 2014, Fisichelli *et al.* 2014, Zhang *et al.* 2015b). Cependant, l'augmentation des érables est observée dans l'ensemble de leur aire de distribution. L'autoécologie des érables doit être considérée de façon plus complexe que simplement selon la tolérance à l'ombre et le statut successional (Nolet *et al.* 2008). En plus de leur tolérance à l'ombre et de leur longévité, les érables présentent certains traits qui les rendent compétitifs suite aux perturbations. Ils produisent une grande quantité de graines qui ont un bon taux de germination sur une grande diversité de substrats, maintiennent une impressionnante banque de semis en sous-bois et ont une croissance rapide lorsqu'exposés à la lumière (Harlow *et al.* 1978, Nolet *et al.* 2008, Fei et Steiner 2009). Certains auteurs suggèrent que les causes de l'augmentation des érables sont multiples, impliquant probablement les changements climatiques, la hausse de CO<sub>2</sub> atmosphérique, les pluies acides, les perturbations à large échelle spatiale, la modification des régimes de feux, le broutage par le cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus* Zimm.) et

l'aménagement forestier (Abrams 1998, Boucher *et al.* 2006; Fei et Steiner 2007, 2009).

Un autre exemple illustrant la complexité des causes des changements de composition est l'expansion du peuplier faux-tremble (*Populus tremuloïdes* Michx.). Cette espèce a augmenté dans plusieurs régions de l'Amérique du Nord au cours du dernier siècle (Friedman et Reich 2005, Kurznel *et al.* 2007, Fortin 2008, Dupuis *et al.* 2011; Boucher *et al.* 2017b). L'espèce est généralement décrite comme étant de début de succession, pionnière après des grandes perturbations, à croissance rapide et peu longévive (Graham 1963). Elle peut facilement coloniser des sites récemment perturbés par reproduction sexuée, puisqu'elle produit une grande quantité de graines légères véhiculées par le vent sur de grandes distances et qui ont un bon taux de germination, particulièrement si l'horizon minéral du sol est exposé (Romme *et al.* 1997, 2005, Fortin 2008). Le peuplier faux-tremble peut aussi drageonner et augmenter son abondance. Le drageonnement est contrôlé par la suppression de la dominance apicale et par l'augmentation de la température du sol, alors que la croissance des drageons est contrôlée par la lumière (Jobidon 1995). L'augmentation du peuplier faux-tremble est généralement interprétée comme étant la conséquence des perturbations récentes, particulièrement les incendies forestiers et les coupes (Graham 1963, Fortin 2008, Laquerre *et al.* 2011). Il existe toutefois un long débat concernant la persistance de l'espèce après feux (Sampson 1916, Kashian *et al.* 2007). Certains auteurs expliquent que l'espèce, peu longévive et intolérante, cède sa place aux espèces tolérantes à l'ombre après quelques décennies (Baker 1918). D'autres auteurs affirment qu'on sous-estime la persistance du peuplier faux-tremble (Bergeron 2000, Cumming *et al.* 2000), et même que l'espèce pourrait former un peuplement permanent dans certaines conditions (Sampson 1916, Fetherolf 1917, DeByle et Winokur 1985). Certains auteurs ont observé plusieurs cohortes de peuplier faux-tremble sur un même site (Kneeshaw et Bergeron 1996, Bergeron 2000, Fortin 2008) et même des peupleraies à structure inéquiennes (Navratil *et al.* 1989).

Dans l'ouest de l'Amérique du Nord, certains auteurs documentent une persistance et une expansion de l'espèce au XX<sup>e</sup> siècle, même en l'absence de feux (Kulakowski *et al.* 2004, 2006, Kurzel *et al.* 2007, Kulakowski *et al.* 2013a, b, Shinneman *et al.* 2013). Au contraire, avec le contrôle actif des feux, certains auteurs s'inquiètent de la diminution de l'espèce (Wirth *et al.* 1996, Kay 1997). Selon ces auteurs, le peuplier faux-tremble serait en diminution dans plusieurs régions de l'Ouest américain, en raison du contrôle des incendies, des épisodes de sécheresses de plus en plus fréquents ou encore du broutage excessif par le wapiti (*Cervus canadensis* Erx.), les populations de ces derniers ayant augmentées suite à la diminution ou l'extinction locale des loups gris (*Canis lupus* L.) (Kauffman *et al.* 2010, Ripple et Beschta 2012, Winnie 2012, Eisenberg *et al.* 2013, Beschta *et al.* 2016).

#### PRECISION DE TERMINOLOGIES EMPLOYEES

Dans la documentation scientifique, les forêts représentatives des conditions naturelles sont désignées par plusieurs appellations. Chaque terme peut avoir une connotation différente. Cette diversité de terminologie peut aussi refléter les différents paradigmes et interprétations de l'écologie forestière. Par exemple, une revue de documentation scientifique a révélé que les publications en écologie forestière tropicale désignent de telles forêts, dans la majorité des cas, avec les termes « *primary* » ou « *undisturbed* », dans le sens de non perturbées par les activités anthropiques (Clark 1996). Les termes « *mature* », « *entirely undisturbed and remote* », « *virgin* », « *undisturbed naturally* » et « *old growth* » ont aussi été retrouvés.

Dans le contexte des forêts tempérées de l'Amérique du Nord, les termes les plus fréquemment utilisés semblent être « *natural* », « *old growth* », « *virgin* » et « *mature* ». Les termes « *balanced uneven-aged* », « *pristine* », « *ancient* » et

« *climax* » sont aussi utilisés (Nowacki et Trianosky 1993). Lorsque les études portent sur des reconstitutions de conditions de forêts passées, les termes « *presettlement* », « *pre-European settlement* » et « *preindustrial* » semblent être les plus retrouvés, avec « préindustrielles » pour les études publiées au Québec en français.

Dans cette thèse, les termes « *presettlement* » et « préindustriel » seront utilisés pour les chapitres rédigés en anglais et français, respectivement, afin de correspondre à la terminologie la plus fréquemment employée dans la documentation scientifique. Même si les deux termes ont une connotation légèrement différente, où « *presettlement* » réfère à la forêt avant la colonisation du territoire et « préindustriel » référant à la forêt avant l'ère de l'exploitation industrielle, les deux termes peuvent s'appliquer à la région d'étude de la thèse.

## AMENAGEMENT ECOSYSTEMIQUE ET ECOLOGIE HISTORIQUE

Les pratiques d'aménagement du territoire et d'exploitation des ressources naturelles évoluent et répondent de plus en plus aux enjeux des changements globaux. Par exemple, le dernier régime forestier au Québec préconise l'aménagement écosystémique sur environ 70 % du territoire forestier productif public (MRNF 2008). L'aménagement écosystémique, ou « *ecosystem-based management* », vise à aménager les écosystèmes en considérant l'ensemble des interactions et des processus écologiques afin de répondre aux besoins humains tout en maintenant l'intégrité écologique des forêts (Christensen *et al.* 1996). Au Québec, le concept a été mis de l'avant par la Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise (2004) et vise à s'inspirer du régime de perturbations naturelles. Par exemple, en s'inspirant des connaissances actuelles sur le régime des perturbations naturelles (feux, chablis, épidémies, trouées) en Gaspésie, il a été suggéré qu'environ 39 % du

territoire soit aménagé en forêts équiennes avec une période de révolution de 80 ans, 22 % du territoire en forêts inéquiennes et environ 40 % avec des récoltes d'un même tenant de moins d'un hectare (Kneeshaw *et al.* 2008). De plus, au Québec l'aménagement écosystémique vise à réduire l'écart entre la forêt naturelle et la forêt aménagée, pour tendre à maintenir les écosystèmes à l'intérieur de leur variabilité naturelle, et ce pour six attributs : composition, classes d'âge, structure interne, organisation spatiale, bois mort et habitat d'espèces sensibles (Varady-Szabo *et al.* 2008, Pinna *et al.* 2009b). Maintenir les écosystèmes à l'intérieur de leur gamme de variabilité naturelle aide à préserver la biodiversité, les processus et les services écosystémiques (Hunter 1990, Keddy *et al.* 1993, Steedman et Haider 1993, Morgan *et al.* 1994, Litvaitis 2003, Keane *et al.* 2009, Rompré *et al.* 2010).

La réalisation de l'aménagement écosystémique demande de connaître l'état de la forêt naturelle et sa variabilité ainsi que de son régime de perturbations. Ces connaissances permettent ensuite de mesurer l'écart entre la forêt aménagée et la forêt naturelle. La majorité de la forêt tempérée de l'Amérique du Nord, dont le Québec méridional, a déjà été aménagée ou affectée par des agents de changements globaux. Ainsi, ces forêts ne sont possiblement plus représentatives des conditions naturelles. Même si certaines forêts ont échappé aux perturbations anthropiques et peuvent nous renseigner sur les conditions naturelles (Noss 1985, Nowacki et Trianosky 1993), il est risqué de généraliser l'état de ces forêts en dehors de leur contexte local. Souvent, ces forêts ne sont pas représentatives des conditions régionales en raison de conditions atypiques (petite taille, difficulté d'accès, milieu humide, pente abrupte, etc.). De plus, ces forêts n'ont pas été épargnées par des perturbations anthropiques à plus vaste échelle (changements climatiques, modification du cycle de l'azote, introduction d'espèces exotiques, etc.) (Vitousek 1994, Clark 2001).

En l'absence de témoins naturels, l'écologie historique peut nous permettre de reconstituer l'état des écosystèmes avant les grandes perturbations anthropiques

(Noss 1985). Au Québec, l'état de référence choisi est la forêt préindustrielle (Pinna *et al.* 2009b, Boucher *et al.* 2011). Plusieurs méthodes d'écologie historique permettent de reconstituer l'état de la forêt préindustrielle, chacune d'entre elles comportant ses forces et ses faiblesses (Noss 1985, Crumley 1994, Egan *et al.* 2005). Par exemple, les actes notariés du XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècle, c'est-à-dire des documents archivés décrivant les volumes et les essences vendues en bois de chauffage, ont permis de reconstituer la composition forestière des forêts du sud-ouest du Québec (Brisson et Bouchard. 2003). Toutefois, un doute demeure quant à la représentativité de ces données pour décrire la composition des forêts, puisque les bois récoltés et vendus pouvaient ne pas être sélectionnés au hasard. Une autre approche, les cartes historiques des peuplements forestiers, a permis de reconstituer avec une couverture complète du territoire et de façon spatialement explicite, la composition et l'organisation spatiale de paysages forestiers dans l'est du Canada (Lévesque 1997, Brunet 2002, Etheridge 2005, Boucher *et al.* 2006, 2009b, Boucher et Grondin 2012). Cependant, les informations ne concernent généralement que le type de couvert (résineux, mixte ou feuillu), sans description complète des espèces et certaines cartes sont relativement récentes, décrivant une forêt déjà partiellement anthropisée.

Une autre méthode disponible pour reconstituer la composition forestière préindustrielle est l'utilisation des observations de composition forestière notées lors de l'arpentage primitif du territoire. Ces données offrent l'avantage d'être spatialement explicites, de couvrir systématiquement un grand territoire, d'avoir été prises avec une méthodologie constante et de dater du XVIII<sup>e</sup>, XIX<sup>e</sup> et du début XX<sup>e</sup> siècle, soit avant la colonisation et l'exploitation industrielle des forêts. Aux États-Unis et au Canada, ces observations sont surtout du type « arbres témoins » (*witness trees*) (Bourdo 1956, Whitney 1994). Les arpenteurs de l'époque ont divisé le territoire en comtés, cantons, rangs et lots. Afin de créer des points de repère pour marquer les divisions, les arpenteurs sélectionnaient un ou quelques arbres témoins aux coins des lots sur lesquels ils marquaient l'identification du lot. Puis, dans des

carnets aujourd'hui archivés, ils notaient l'essence et le diamètre de chacun de ces arbres témoins, ainsi que la distance et l'azimut séparant les arbres témoins d'un même coin de lot. Ces données ont été compilées et analysées par plusieurs dizaines d'études réalisées aux États-Unis (Sears 1925, Lutz 1930, Mladenoff *et al.* 1993, White et Mladenoff 1994, Whitney 1994, Foster *et al.* 1998, Schulte et Mladenoff 2001, Cogbill *et al.* 2002, Wang *et al.* 2009, Thompson *et al.* 2013) et par quelques unes réalisées au Canada (Lutz 1997, Blackadar 2002, Crossland 2006, Aubé 2008, Bjorkman et Vellend, 2010), permettant de reconstituer la composition forestière, la structure diamétrale et la densité des forêts.

Un autre type de données présent dans les archives de l'arpentage primitif est les descriptions linéaires des peuplements. À partir de 1792, le territoire du Québec méridional a été systématiquement arpenté. Les équipes dirigées par les arpenteurs ont ouvert et divisés le territoire en dégageant la végétation sur une largeur d'environ six pieds (1,83 m) le long des limites de territoires. En même temps qu'ils mesuraient et divisaient le territoire, les arpenteurs ont noté des descriptions de composition forestière (Martel et Tanguay 1982, Boudreau et Gaudreau 2007). Ces observations indiquent généralement le début et la fin des peuplements croisés le long des lignes arpentées. Les descriptions sont habituellement sous forme d'énumérations des taxons arborescents en ordre décroissant d'importance (exemple : « Sapin, épinette et quelques bouleaux »). Aux États-Unis, ces données ont été utilisées dans quelques études (Fritschle 2009, 2012, Larsen *et al.* 2012, Tulowiecki 2014). Au Canada, elles ont été utilisées au Manitoba et en Ontario (Pile 1969, Gentilcore et Donkin 1973, Cwynar 1977, Clarke et Finnegan 1984, Elliot et Shiels 1994, Jackson *et al.* 2000, Hanuta 2001, Leadbitter *et al.* 2002, Suffling *et al.* 2003, Pinto *et al.* 2008) ainsi qu'au Québec (Pinna *et al.* 2009a, Mauri Ortuno 2010, Dupuis *et al.* 2011, Terrail *et al.* 2014, Danneyrolles *et al.* 2016a, b, Laflamme *et al.* 2016).

## REGION D'ETUDE : ASPECTS BIOGEOGRAPHIQUES

La région d'étude pour le premier et second chapitre de la thèse est l'ensemble de la péninsule gaspésienne, alors que le troisième chapitre se concentre sur la pointe sud de la péninsule. La péninsule gaspésienne recoupe les régions administratives de la Gaspésie et du Bas-Saint-Laurent et se situe entre les latitudes 47° 59'N et 49° 14'N et les longitudes 64° 8'W et 67° 23'W, couvrant 26 500 km<sup>2</sup>. La région est limitée par le Golfe du Saint-Laurent au nord et à l'est, la Baie-des-Chaleurs au sud et la vallée de la Matapédia à l'ouest.

La péninsule gaspésienne est comprise dans la formation géologique des Appalaches, avec une roche mère généralement d'origine sédimentaire (grès, shale, calcaire, conglomérat) et des dépôts généralement composés de till, d'altérite, de colluvion sur les versants et d'alluvion dans les vallées (Robitaille et Saucier 1998). Le relief est accidenté, formé de collines arrondies, de larges plateaux et de profondes vallées avec des pentes abruptes et de forts gradients d'altitude. Les altitudes moyenne et maximale sont de 450 m et de 1270 m, respectivement. Les basses terres sont retrouvées en périphérie, surtout au sud de la région et comprennent plusieurs terrasses alluviales. Le climat est froid et humide, subissant une influence montagnarde et maritime. La station météorologique de Murdochville (centre de la péninsule) et celle de New-Carlisle (pointe sud de la péninsule) enregistrent respectivement une température annuelle moyenne de 1,7 °C et de 3,7 °C, 1117 mm et 1096 mm de précipitation, 48 % et 23 % tombant sous forme de neige (Environnement Canada 2017).

Les principaux paramètres climatiques de la région semblent être demeurés stables au cours du XX<sup>e</sup> siècle. Yagouti *et al.* (2006, 2008) ont analysé les données de 52 stations météorologiques du Québec méridional de 1960 à 2003. Plusieurs paramètres ont été mesurés à l'échelle annuelle et saisonnière, comme la température minimale, moyenne et maximale, le cumul de précipitations sous forme de pluie ou

de neige, la longueur de la saison de croissance, le cumul de degré jours, etc. Les auteurs ont constaté que le changement climatique ne s'est pas manifesté uniformément sur le territoire du Québec. L'ouest, le centre et le sud du Québec méridional ont enregistré les changements les plus importants mais les tendances au changement diminuent à mesure qu'on se déplace vers l'est. Dans la péninsule gaspésienne, quatre stations météorologiques ont été incluses dans les analyses et montrent des tendances nulles, de faible amplitude et non statistiquement significatives.

L'aire d'étude est presque entièrement à vocation forestière (98%), comprenant des forêts publiques et privées sous aménagement (70 % et 20 % du territoire respectivement) et des aires protégées strictes (8 % du territoire) (IUCN 2008, catégories I, II et III). L'agriculture et les aires urbaines couvrent moins de 2 % du territoire. Selon la cartographie écoforestière du dernier inventaire forestier du Gouvernement du Québec (2004), environ 60 % du couvert forestier est équien et de moins de 60 ans (MFFP 2015). Les jeunes peuplements sont généralement feuillus ou mixtes, comprenant une proportion importante de peuplier faux-tremble et de bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.). Les peuplements plus âgés sont habituellement résineux ou mixtes, composés surtout de sapin baumier, d'épinette blanche et d'épinette noire. Le thuya occidental (*Thuja occidentalis* L.) est retrouvé sur les sites à drainage lent (Grondin 2000). Le bouleau jaune, l'érable à sucre et l'érable rouge sont retrouvés sur les sites riches en périphérie de la péninsule.

La forêt du centre de la péninsule (15 300 km<sup>2</sup>) est classée en forêt boréale, tandis que la périphérie (11 100 km<sup>2</sup>) est classée en forêt tempérée. Selon la classification écologique canadienne, cette périphérie correspond à la forêt des Grands-Lacs et du Saint-Laurent tandis que le centre correspond à la forêt boréale (Halliday 1937, Rowe 1972). Selon la classification écologique du Québec, la périphérie appartient au domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune alors que le centre de la région appartient à la sapinière à bouleau blanc (Robitaille et

Saucier 1998). Les espèces les plus fréquentes sont le sapin baumier, l'épinette noire, le bouleau à papier, le peuplier faux-tremble, l'épinette blanche, le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.) et le thuya occidental. La végétation potentielle correspond à l'érablière à bouleau jaune près de la Baie-des-Chaleurs alors que le reste de la périphérie correspond à la sapinière à bouleau jaune et la bétulaie jaune à sapin (Grandtner 1972). Au centre, on retrouve la sapinière à bouleau blanc et à épinette blanche, la sapinière à épinette noire et la pessière à mousse. La toundra alpine occupe les sommets des Chic-Chocs. Des érablières et des sapinières à bouleau jaune et à érable rouge peuvent être retrouvées dans les fonds de vallées abritées jusqu'à 500 m d'altitude (Grondin *et al.* 2000). Les sites à plus de 650 m d'altitude sont propices aux peuplements montagnards comme des sapinières à bouleau blanc et à épinette noire.

Des analyses polliniques ont permis de reconstituer la recolonisation végétale suite à la dernière glaciation (Potzger 1953, Livingstone 1968, Labelle et Richard 1984, Richard et Labelle 1989, Jetté et Richard, 1992, Richard 1994, Marcoux et Richard 1995, Richard *et al.* 1997, Asnong et Richard 2003). La péninsule gaspésienne a été sous l'emprise des glaces jusque vers 12 500 BP sur la côte et 9000 BP au centre. Une toundra herbacée puis arbustive a dominé jusqu'à environ 9000 BP, avant l'afforestation par l'épinette noire, l'épinette blanche et le peuplier faux-tremble. Au cours des deux millénaires suivants, la forêt s'est fermée et diversifiée. Au sud et dans les vallées, des espèces thermophiles se sont établies, telles le bouleau jaune, l'érable à sucre, l'érable rouge, l'orme d'Amérique (*Ulmus americana* L.), le frêne noir (*Fraxinus nigra* Marsh.), le chêne rouge (*Quercus rubra* L.) et le pin blanc (*Pinus strobus* L.). Des pollens de pruche du Canada (*Tsuga canadensis* (L.) Carrière) y ont aussi été trouvés. Pendant ce temps, le centre de la péninsule restait dominé par les espèces boréales, soit le sapin baumier, l'épinette noire et le bouleau à papier. Entre 4000 et 1000 BP, la diversité spécifique a diminué ainsi que l'abondance des espèces thermophiles, menant à la dominance des épinettes

et du sapin baumier. On détecte un retour des espèces héliophiles et des arbustes au cours du dernier millénaire.

Plusieurs descriptions de la végétation de la péninsule gaspésienne du XIX<sup>e</sup> et du début du XX<sup>e</sup> siècle rapportent que la forêt était résineuse ou mixte, composée surtout de sapin baumier, d'épinette blanche et noire, de thuya occidental et de bouleau à papier (Ells 1884, Low 1884, Langelier 1906, Rouillard 1914, Blanchard 1930, Guité Pitre 1940, Halliday et Brown 1943, Dansereau 1950, Köestler 1959, Lafond et Ladouceur 1968). Les reconstitutions de la forêt préindustrielle menées dans l'est du Québec ont utilisé des cartes forestières, des inventaires forestiers et des plans d'aménagements des années 1920-1960 (Lévesque 1997, Brunet 2002, Etheridge *et al.* 2005, Boucher *et al.* 2006, 2009b, Barrette *et al.* 2010). Leurs conclusions sont que la forêt préindustrielle était surtout résineuse, avec des peuplements mixtes et feuillus en haut de pente (Boucher *et al.* 2009b). L'analyse d'archives d'arpentage dans la région voisine du Bas-Saint-Laurent a montré que la forêt préindustrielle était dominée de sapin baumier, d'épinette blanche ou noire et de thuya occidental, accompagné de bouleau à papier et de bouleau jaune. Les peuplements feuillus et mixtes de haut de pente étaient surtout des érablières à bouleau jaune (Boucher *et al.* 2006, Dupuis *et al.* 2011).

Plusieurs textes du XIX<sup>e</sup> et du début du XX<sup>e</sup> siècle mentionnent la présence d'espèces thermophiles (espèce située au nord de son aire de répartition continue) dans la péninsule gaspésienne, soit le pin blanc, le pin rouge (*Pinus resinosa* Ait.), le frêne noir, l'orme d'Amérique, le hêtre à grande feuille (*Fagus grandifolia* Ehrh.) et le chêne rouge (Bouchette 1815, 1831, Drapeau 1863, Langelier 1884, 1905, 1906, Rouillard 1914, Service de renseignement sur les ressources naturelles 1926, Campagna 1939). Sur les sites les plus protégés (vallées intérieures et quelques collines), Dansereau (1944) décrit des érablières composées « d'érable à sucre, d'hêtre à grande feuille, d'érable de Pennsylvanie, de merisier, de sureau rouge (*Sambucus pubens*), de *Cornus alternifolia*, de *Viola eriocarpa*, d'*Actaea rubra*, de

*Botrychium virginianum* et de *Dicentra Cucullaria*. » Il parle aussi de « *deciduous forest relicts* », caractéristiques des forêts du Haut-Saint-Laurent, avec des espèces comme « *Dicentra canadensis*, *Dentaria diphylla* et *Viola pennsylvanica* » (Dansereau 1950).

Ces peuplements d'espèces thermophiles étaient retrouvés surtout dans les vallées glaciaires (Héту et Gray 1985) qui offrent un sol alluvial riche, des pentes douces, un climat doux et humide, à l'abri du vent, en basse altitude (Langelier 1906, Dansereau 1944, Scoggan 1950). Certains auteurs ont proposé que ces peuplements soient le vestige d'une expansion datant de l'optimum climatique holocène (également appelé période hypsithermale ou xéothermique) (Dansereau 1944, Potzger 1953, Livingstone 1968). On a effectivement observé un maxima de pollen d'érable à sucre, d'érable rouge, d'orme d'Amérique, de frêne noir et de chêne rouge vers 5500 ans BP au sud et à l'est de la Gaspésie (Jetté et Richard 1992). Cependant, au nord et au centre de la Gaspésie, on observa plutôt une expansion continue de l'érable jusque vers 5000 et 4500 ans BP, freinée par des barrières topo-climatiques (altitude, relief, discontinuité d'habitat riverain), sans net maxima (Labelle et Richard 1984, Asnong et Richard 2003).

## **REGION D'ETUDE : ASPECTS HISTORIQUES**

Avant l'arrivée des colons européens, les Algonquiens Mi'kmaq occupaient la périphérie de la région et n'occupaient peu ou pas le centre de la péninsule (Blanchard 1930, Desjardins *et al.* 1999). Les premiers colons européens sont arrivés au XVII<sup>e</sup> siècle et ont d'abord occupé la périphérie de la région. Les premières intrusions dans le centre de la région ont eu lieu au XIX<sup>e</sup> siècle par des explorateurs scientifiques (botanistes et géologues), les premiers arpenteurs et les premières exploitations forestières sélectives le long des rivières.

Dès l'arrivée des colons européens, le bois de meilleure qualité a été prélevé, surtout à des fins domestiques. Au cours du XVIII<sup>e</sup> siècle, les frênes ont été coupés par les pêcheurs pour la fabrication de barils et d'outils (Langelier 1884) tandis que les pins blancs et rouges étaient particulièrement utilisés pour la construction de mats de bateaux (Langelier 1906, LeGros 1964, Desjardins *et al.* 1999). Dans les années 1830, ces pins auraient surtout été exportés vers des chantiers étrangers, même si certains étaient utilisés localement dans une dizaine de chantiers navals (Bouchette 1831). L'exploitation spécifique des pins a duré jusqu'au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, le bois de meilleure qualité devenant alors rare le long de la côte en même temps que le métal était de plus en plus utilisé dans la construction des navires (Desjardins *et al.* 1999). On estime que cette première phase d'exploitation a eu des impacts mineurs car les coupes étaient mal organisées et ne s'étendaient que sur quelques milles à l'intérieur des terres (Langelier 1884, 1905, Blanchard 1930, 1935, Desjardins *et al.* 1999).

D'autres espèces ont été exploitées au cours des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles. Dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, le territoire était presque totalement concédé à des compagnies forestières, quoique grandement inexploité (Langelier 1884, Desjardins *et al.* 1999). Seuls les premiers milles à l'aval des cours d'eau majeurs étaient exploités, où la drave était pratiquée (Service de renseignement sur les ressources naturelles 1926, Blanchard 1935, Desjardins *et al.* 1999). Les espèces ciblées étaient surtout le thuya occidental, les épinettes et les bouleaux (Langelier 1884, 1906, Blanchard 1935). Le thuya occidental et les épinettes étaient particulièrement prisés comme bois de construction, puis les épinettes et le sapin baumier ont été de plus en plus utilisés comme bois de pulpe. Quelques dizaines de scieries existaient au début du XX<sup>e</sup> siècle, mais peu d'entre elles avaient une capacité qui dépassait 250 m<sup>3</sup> (ou un peu plus d'environ 25 000 pmp) par an (Desjardins *et al.* 1999). L'exploitation forestière s'est répandue à l'ensemble de la région à partir des décennies 1930-1940, avec le

développement de la scie à chaîne, d'un réseau routier et du transport de bois par camion.

Le déboisement des terres à des fins agricoles a eu lieu au XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècle et était concentré dans la périphérie de la région. La colonisation a progressé lentement et avec difficulté, probablement en raison de du relief accidenté de la région et de la difficulté d'y construire des chemins (Blanchard 1930, 1935). Les chemins existants qui ne reliaient que quelques villages étaient de mauvaise qualité, mal entretenus et comportaient peu de ponts pour de traverser les rivières (Blanchard 1935, Desjardins *et al.* 1999). Le premier chemin faisant le tour de la Gaspésie et traversant la vallée de la Matapédia (la route 132) a été complété en 1928. Le chemin de fer Intercolonial a rejoint la Matapédia en 1876, Paspébiac (sud de la Gaspésie) en 1902 et Gaspé (extrémité orientale) en 1911 (Blanchard 1935, Desjardins *et al.* 1999).

Même si la colonisation était restreinte à la périphérie de la Gaspésie, plusieurs incendies liés à la colonisation ont été échappés et ont brûlés le centre de la péninsule (BAEQ 1966, Le Groupe Dryade 1986, Terrail 2013). Comme ailleurs dans l'est de l'Amérique du Nord, la majorité des incendies du début du XX<sup>e</sup> siècle étaient d'origine anthropiques, causés par des feux d'abattis, des locomotives, des travailleurs forestiers ou des campeurs (Cwynar 1977, Wein et Moore 1977, 1979, Le Groupe Dryade 1986, Annett 1992, Blanchet 2003; Boucher *et al.* 2014). À partir du XIX<sup>e</sup> siècle, de la sensibilisation auprès de la population et des réglementations plus sévères ont été mises en place, tentant de réduire les incendies forestiers d'origine anthropique (Assemblée législative 1869). Le plus important feu documenté, le feu de 1924 de la rivière Bonaventure, brûla 158 459 ha (BAEQ, 1966).

**REGION D'ETUDE : REGIME DE PERTURBATIONS NATURELLES**

La forêt naturelle de la Gaspésie est généralement vieille et dynamisée par des perturbations partielles ou de petite superficie. Le chablis a souvent été décrit comme la perturbation principale dans les sapinières gaspésiennes (Lévesque 1997, Dansereau 1999, Brunet 2002, Dallaire 2004), avec à l'occasion des chablis de grande envergure (Webb 1957, 1961, Ruel et Benoit 1999). Le sol peu profond, le système racinaire superficiel des arbres, les pentes abruptes et l'exposition aux forts vents en seraient la cause (Foster et Reiners 1983, Ruel *et al.* 1998, Dansereau 1999, Ruel et Benoit 1999, Ruel 2000). Les épidémies d'insectes semblent être fréquentes dans la région (Swaine et Craighead 1924, Gobeil 1938, Lachance *et al.* 1990). Les épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette sont survenues à trois reprises au XX<sup>e</sup> siècle (Blais 1983) et sont survenues tous les 35-40 ans pendant les derniers 400 ans (Blais 1961, Boulanger et Arseneault 2004, Boulanger *et al.* 2012) et possiblement même au cours des derniers 2000 ans dans la pessière à mousse (Lapointe 2013). Dans les décennies 1930-1940, une épidémie du dendroctone de l'épinette (*Dendroctonus rufipennis* Kby.) et une épidémie du diprion européen de l'épinette (*Gilpinia hercyniae* Htg.) ont affecté jusqu'à 60 % des épinettes matures de la région (Balch 1942a, b, Lachance *et al.* 1990).

Les différentes évaluations du régime de feux réalisés en Gaspésie rapportent des résultats variables. Le Groupe Dryade (1986) a estimé un cycle de feu allant de 555 ans à 720 ans pour la période 1846-1945 dans la région du Parc National Forillon tandis que Plourde et Gagnon (1996) ont proposé une valeur de 831 ans. Dans la même région, Richard (1997) a mesuré un intervalle moyen de 198 ans entre les feux pour les 2000 dernières années. Gauthier *et al.* (2001) ont suggéré un cycle long (200 à 500 ans) pour le centre de la Gaspésie alors que Lauzon *et al.* (2007) ont évalué un cycle de feux de 89 ans pour la période 1680-1850 et 176 ans pour la période 1850-2003. Toutefois, ces auteurs ont considéré que l'âge des peuplements reflète le temps

depuis le dernier feu, ce qui est risqué dans une région avec un régime de perturbations secondaires aussi important. Ils ont aussi inclus dans leurs calculs le grand feu de la Bonaventure de 1924, possiblement d'origine anthropique (BAEQ 1966). En excluant ce seul feu, la valeur du cycle monte à 650 ans (période 1925-2003), une valeur comparable à celles des autres études. Les espèces pyrophiles, adaptées aux feux fréquents, telles le peuplier faux-tremble ou le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) étaient peu abondantes dans la forêt préindustrielle, voir absentes, ce qui soutient l'idée de feux inféquents. À l'inverse, les espèces tolérantes à l'ombre et pyrophobes auraient été dominantes, suggérant également l'importance des perturbations secondaires par rapport aux feux (Furyaev *et al.* 1983, Bergeron et Leduc 1998, Bergeron 2000, Gauthier *et al.* 2001, Kneeshaw 2001, Ruel et Pineau 2002, de Römer *et al.* 2007, Ali *et al.* 2008).

Finalement, le régime de perturbations naturelles de la péninsule gaspésienne présente probablement une certaine variabilité spatiale. Par exemple, il a été suggéré que les régions en altitude soient moins sujettes aux épidémies d'insectes et aux feux mais plus sujettes aux chablis (Webb 1957, Blais 1961, Dansereau 1999), ou encore que le centre de la péninsule soit plus susceptible aux feux et qu'on y retrouvait plus d'épinettes noires (Côté *et al.* 2008). On retrouve d'ailleurs plusieurs pessières noires et peupleraies post-incendies dans la région du bassin de la rivière York, au centre de la péninsule. Des feux ont brûlé dans cette région en 1867, 1868, 1921, 1938 et 1941 (MacArthur et Gagnon 1959, 1961, MacArthur 1964, Gagnon 1973, Annett 1992). Les deux derniers feux sont présumément d'origine anthropique, tandis que les trois autres demeurent de cause inconnue. Avant ces feux, la forêt était composée de sapin baumier, de bouleau à papier, de peuplier faux-tremble et d'épinette noire (Fortin 1999, 2008).

## CONTEXTES ET OBJECTIFS DE LA THESE

L'objectif général de la thèse est de reconstituer la composition forestière préindustrielle de la péninsule gaspésienne à partir des archives de l'arpentage primitif, de mesurer les changements de compositions et de comprendre les causes de ces changements. Plus précisément, l'objectif du premier chapitre est d'analyser et de comparer différents types de données issues des archives d'arpentage, pour en évaluer leur utilité et leur robustesse respective. Ces données sont les arbres témoins et les descriptions linéaires de peuplements, issues à la fois des arpentages de cantons et des arpentages de rivières. L'objectif du second chapitre est de reconstituer la distribution spatiale et altitudinale des taxons arborescents de la région, de les comparer aux distributions modernes et de mesurer la contribution relative des feux et des coupes du XX<sup>e</sup> siècle dans le changement de composition documenté. L'objectif du troisième chapitre est d'utiliser de multiples jeux de données décrivant une même région en plusieurs époques pour documenter la chronologie des changements de composition et l'impact des perturbations.

Cette thèse s'insère dans plusieurs contextes. Elle contribue à améliorer nos connaissances sur l'Anthropocène et les changements globaux, en documentant comment ces derniers affectent une région située à la transition entre les écozones boréale et tempérée. Les résultats de cette thèse peuvent aussi servir à planifier l'aménagement écosystémique de la région, en fournissant un portrait précis de la composition préindustrielle et en mesurant les écarts avec la forêt moderne. Ils permettent aussi d'alimenter de façon originale la discussion quant au rôle respectif des changements climatiques et des perturbations anthropiques dans les changements de composition documentés. Cette thèse s'insère dans un vaste projet de reconstitution de composition de forêt préindustrielle du Québec méridional à partir d'archives d'arpentage. Une imposante base de données est en construction depuis 2006 par l'équipe du professeur Dominique Arseneault, comptant une centaine de

milliers d'observations qui s'étendent du Témiscamingue à la Gaspésie. Cette étude se démarque des autres projets en cours ou réalisés dans le cadre de ce vaste projet (Dupuis 2009, Mauri-Ortuno 2010, Laflamme 2012, Terrail 2013, Danneyrolles 2016) par quelques aspects originaux : 1- la région d'étude est divisée, à part pratiquement égale, entre l'écozone boréale et tempérée, 2- de forts gradients altitudinaux et un étagement de la végétation est rencontré dans la région, 3- plusieurs types de données, issues de plusieurs types d'arpentage sont comparées et utilisés pour reconstituer les changements de composition, 4- les changements de composition sont analysés dans un contexte de climat régionalement stable mais d'activité anthropique au cours du dernier siècle et 5- la chronologie du changement de composition est analysée grâce au réarpentage d'une même région d'étude.



**CHAPITRE I**  
**RECONSTITUTION DE LA COMPOSITION FORESTIÈRE**  
**PRÉINDUSTRIELLE DANS LA PÉNINSULE GASPÉSIENNE À PARTIR DES**  
**ARCHIVES DE L'ARPENTAGE PRIMITIFS DES CANTONS ET DES**  
**RIVIÈRES**

**I.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE**

Ce premier article, intitulé « *Multiple early land survey datasets accurately describe the presettlement forest composition in the Gaspé Peninsula, eastern Canada* » a été rédigé par moi-même et par le professeur Dominique Arseneault. Cet article est écrit en langue anglaise et formaté en vue d'une publication dans la Revue canadienne de recherche forestière. En date du dépôt de cette thèse, cet article n'a pas été soumis à la revue.

Nous avons utilisé plusieurs types d'archives d'arpentage de la période 1820-1966 afin de reconstituer la composition forestière préindustrielle de la péninsule gaspésienne dans l'est du Canada. Deux types d'archives d'arpentage ont été utilisés, l'arpentage de rivières et l'arpentage de cantons, contenant chacun deux types de données, les arbres témoins et les descriptions linéaires. Au total, 3668 arbres témoins ont été géoréférencés, 39 % le long des rivières et 61 % sur des lignes cantonales, alors que 19 787 descriptions linéaires ont été géoréférencés, 24 % le long des rivières et 76 % sur des lignes cantonales. Ces observations préindustrielles ont été comparées aux placettes d'inventaire forestier modernes (1976-2008; n = 27 521).

Tous les jeux de données décrivent une forêt préindustrielle similaire, suggérant qu'ils sont robustes. L'écozone boréale de la région comprenait des forêts de sapin baumier, d'épinettes et de bouleau à papier, alors que l'écozone tempérée était plus diversifiée,

comprenant du thuya occidental, du bouleau jaune, des pins et des érables en plus des taxons boréaux. Les placettes d'inventaire modernes montrent un déclin du thuya, des pins et du bouleau jaune, au profit du bouleau à papier, des peupliers et des érables.

Selon nos résultats, les données issues de l'arpentage des cantons sont les plus adéquates pour reconstituer la composition préindustrielle, puisque le nombre de données disponible est important et le gradient altitudinal est échantillonné de façon représentative, tandis que l'arpentage de rivières offre un nombre de données plus limitées et généralement restreint aux basses élévations. Les données des descriptions linéaires sont plus adéquates que celles des arbres témoins, puisqu'elles sont plus nombreuses et que les peuplements sont décrits par une énumération de plusieurs taxons, tandis que les arbres témoins ne mentionnent qu'un seul taxon. Les fréquences des taxons notés dans les données des arbres témoins se comparent aux valeurs de dominances dérivées des descriptions linéaires. Ces constats peuvent nous aider à combiner des données et des résultats d'études qui se sont basées sur des bases de données différentes.

Mots-clés : écologie forestière historique, comparaison de base de données, forêt préindustrielle, archive d'arpentage, changement de composition, forêt boréale, forêt tempérée, arbres témoins, descriptions linéaires

## **I.2 MULTIPLE EARLY LAND SURVEY DATASETS ACCURATELY DESCRIBE THE PRESETTLEMENT FOREST COMPOSITION IN THE GASPÉ PENINSULA, EASTERN CANADA**

### **I.2.1 Abstract**

We used multiple types of early land survey records (1820-1966) to reconstruct the presettlement forest composition of the Gaspé Peninsula, eastern Canada. Two types of land survey archives were used: river and township surveys, each providing two distinct datasets including both witness trees and line descriptions. A total of 3668 witness trees were georeferenced, 39% along rivers and 61% along township lines, while 19 787 line descriptions were georeferenced, 24% along rivers and 76% along township lines. These presettlement forest observations were compared to modern forest inventory plots (1976-2008; n = 27 521) to assess the forest compositional changes.

All land survey datasets portray similar presettlement forest compositions, suggesting robust reconstructions. The boreal ecozone of the region comprised mostly balsam fir, spruces and paper birch, while the temperate ecozone was more diverse, comprising eastern white cedar, yellow birch, maples and pines in addition to the boreal taxa. The modern forest inventory plots show a decrease in eastern white cedar, pines and yellow birch, while paper birch, poplars and maples increased in prevalence between the two time-periods.

According to our results, the data from the township surveys are the most adequate to reconstruct the pre-settlement composition, since the available data is large and the altitudinal gradient is representatively sampled, while river surveys offer fewer data that are generally restricted to low elevations. Data from linear descriptions are more adequate than those of witness trees, as they are more numerous and stands are described by an enumeration of several taxa, while the witness trees mention only one taxon. The frequencies of the taxa noted in the witness tree data compare with the dominance values derived from the linear descriptions. These findings can help us to combine data and results from studies that are based on different databases.

Key words: historical forest ecology, database comparison, presettlement forest, early land survey, compositional change, boreal forest, temperate forest, witness trees, line descriptions

### **I.2.2 Introduction**

Major changes have occurred in the North American forests following European settlement. In response to anthropogenic disturbances, such as industrial logging, forest clearance for agriculture and escaped settlement fires (Foster and Aber 2004; Johnson and Miyanishi 2012; Lorimer 2001; Weir and Johnson 1998), forests have become younger, more fragmented, structurally simplified and composed now by a greater proportion of early successional species (Boucher et al. 2011, 2014; 2017a; Cyr et al. 2009; Foster et al. 1998; Mladenoff et al. 1993). Understanding these transformations and their ecological consequences is important for planning sustainable forest management. However, sites with little or no human disturbance that could provide reference conditions are scarce in several regions and reconstructing the presettlement forest is often the most obvious approach to evaluate post-settlement compositional changes.

Early land survey records have long been used to reconstruct forest composition prior to European settlement in North America. The most frequently used data type in this regard is witness trees data, which generally refers to individual stems selected, identified and measured by the surveyors every half mile along surveyed lines (Bourdo 1956; Whitney 1994). Witness tree data has been used extensively to reconstruct presettlement forest composition across the USA (Cogbill et al. 2002; Schulte and Mladenoff 2001; Whitney 1994), as well as in Atlantic Canada (Aubé 2008; Blackadar 2002; Crossland 2006; Lutz 1997). In some regions, such as the Canadian province of New Brunswick, witness tree data has also been taken along rivers (Aubé 2008). An additional survey data type useful for forest composition reconstruction is known as "line descriptions", which are ranked taxa enumeration done at specified locations along the surveyed lines. Although these line descriptions have been less frequently used than witness trees in the USA (Fritschle 2009, 2012; Larsen et al. 2012; Tulowiecki 2014) they are generally the only data type systematically available in the eastern Canadian provinces of Ontario (Jackson et al. 2000; Pinto et al. 2008; Suffling et al. 2003) and Québec (Dupuis et al. 2011; Terrail et al. 2014; Danneyrolles et al. 2016a, b).

In North America, most studies of the post settlement compositional changes have been performed in the temperate zone (Nowacki and Trianosky 1993; Whitney 1994), where settlement activities have been concentrated. However, the southern fringe of the boreal forest has also been impacted by settlement, land clearing, and anthropogenic fires and some boreal regions have a long history of anthropogenic disturbances (Boucher et al. 2014, 2017b; Johnson and Miyanishi 2012; Weir and Johnson 1998). As compared to the temperate zone, long term reconstructions of forest changes in the boreal zone are scarce or cover a shorter time-period, of about 50 years or less (Boucher and Grondin 2012, Carleton and MacLellan 1994; Harvey and Bergeron 1989; Harvey and Brais 2002; Harvey et al. 1995; Ilisson and Chen 2009; Pinto et al. 2008). Extending these long-term vegetation reconstructions across the temperate-boreal interface using land survey records would allow comparing long term impacts of human activities between these two vegetation types.

The Gaspé Peninsula in eastern Canada offers a useful biogeographic context in this regard (Fig. 1-1). The outer fringe of the peninsula is classified as temperate (Robitaille and Saucier 1998, Rowe 1972) and has long been settled whereas its inland is boreal, almost completely un-inhabited and extensively logged. Previous historical ecology studies in this region have used forest inventories archives from the 1930s to 1960s (Brunet 2002; Lévesque 1997), early land survey records (Pinna et al. 2009) and exploration records (Fortin 2008). However, none of these reconstructions were spatially exhaustive, being restricted to some locations or time-periods. Both townships and rivers were surveyed across the entire peninsula prior to extensive human impacts and logbooks from each of these two survey types contain both witness trees and line descriptions data (Fig. 1-1 and 1-2). Consequently, the main objective of this study is to use all available early land survey data to: 1- reconstruct presettlement forest composition based on the two survey types (townships *vs* river) and the two data types (witness trees *vs* line descriptions) in order to evaluate their respective robustness; 2-compare reconstructions between the temperate and boreal vegetation zones; 3-compare reconstructions to modern forest inventory data in order to evaluate postsettlement compositional changes in each vegetation zone.

### I.2.3 Materials and methods

#### Study area

The Gaspé Peninsula is located in eastern Canada between the latitudes 47° 59'N and 49° 14'N and the longitudes 64° 8'W and 67° 23'W, and is delineated by the Gulf of St. Lawrence to the north and east, the Chaleur Bay to the south and the Matapédia Valley to the west (Fig. 1-1). The inland of the peninsula (15 300km<sup>2</sup>) belongs to the boreal ecozone whereas its outer fringe (11 100km<sup>2</sup>) corresponds to the temperate ecozone (Rowe 1972). According to the Québec forest classification system, the temperate outer fringe and the boreal inland correspond to the balsam fir-yellow birch and balsam-fir-white birch bioclimatic domains, respectively (Robitaille and Saucier 1998). Hereafter, these two domains are referred to as the temperate and the boreal ecozones, respectively.

The study area belongs to the Appalachian geological formation, with sedimentary bedrock (sandstone, shale, limestone and conglomerate) and surficial deposits of glacial and *in situ* weathering origins (Robitaille and Saucier 1998). The terrain consists of round-shaped mounts and hills, large plateaus and deep valleys. Several steep slopes and high elevation gradients are present. The mean and maximum elevations are 450 meters and 1270 meters, respectively. The climate is cold and wet, with mountainous and maritime influences. The Murdochville (in the center of the peninsula) and the New-Carlisle meteorological stations (in the south) record mean annual temperatures of 1.7°C and 3.7°C, along with precipitation totals of 1117mm and 1096mm, 48% and 23% of which falls as snow, respectively (Environment Canada 2017).

Natural disturbances are mostly canopy gaps and windfalls, probably due to the steep slopes and shallow soils (Ruel 2000), along with insect outbreaks (Balch 1942a, b; Gobeil 1938; Lachance et al. 1990). Spruce budworm (*Choristoneura fumifera* Clem.) outbreaks occurred three times during the 20th century (Blais 1983) and probably recurred every 40 years or so over the last 400 years (Blais 1961; Boulanger and Arseneault 2004; Boulanger et al. 2012). The fire regime is characterized by a relatively long fire cycle, varying from

200 to 800 years (Gauthier et al. 2001; Le Groupe Dryade 1986; Plourde and Gagnon 1996; Richard 1997). A few large fire events in the first half of the 20th century drove the fire cycle below 200 years in some parts of the peninsula (Lauzon et al. 2007).

Prior to European settlement, the Algonquian Mi'kmaq occupied the temperate ecozone of the peninsula, with little intrusion into the boreal inland (Blanchard 1930; Desjardins et al. 1999). The first European settlers arrived in the 17th century and occupied the outer fringe of the peninsula. The first intrusions into the inland occurred during the 19th century, including scientific exploration, land surveys and selective logging along watercourses. Forest clearance for agriculture took place in the 19th and 20th centuries and was concentrated in the temperate ecozone, but settlement fires escaped toward the center of the peninsula (BAEQ 1966; Le Groupe Dryade 1986; Terrail 2013). Industrial logging began around 1900 along most rivers, which were used for timber floating. Logging operation became extensive after the 1940s, with the development of a denser road network and truck transport.

The study area is almost entirely forested, mostly as public and private land under management (70% and 20% of the territory, respectively) and strict protection (8% of the territory) (IUCN 2008, categories I, II and III). Agriculture and urban areas cover less than 2% of the territory. According to the most recent forest survey (2004), about 60% of the forest landscape is even-aged and less than 60 years old (MFFP 2015). Early successional stands are generally deciduous or mixed and comprise a large proportion of trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx.) and paper birch (*Betula papyrifera* Marsh.). Late successional stands are generally coniferous or mixed and comprise mostly balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.), white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) and black spruce (*Picea mariana* (Mill) B.S.P.). Eastern white cedar (*Thuja occidentalis* L.) is found mostly on hydric sites along streams, rivers and lakes (Grondin et al. 2000).

### Database development

In the 19th and early 20th centuries, surveyors mapped the rivers of the peninsula and divided the land into townships. Surveyors walked the rivers in an upstream direction, mapping their course and describing their surrounding topography, soils and forests. During township surveys, they walked along straight lines, describing the topography, hydrography, soils and the forest composition. These surveys generally took place during the winter season.

Forest composition at the time of the surveys can be reconstructed from witness tree or line description data. On one hand, our database includes 1430 witness tree observations from the river and 2237 from the township surveys. All the witness trees are individual stems identified to the taxa level, measured (diameter at breast height; DBH) and blazed every mile along township lines and rivers. On the other hand, line descriptions can be separated into two groups: line or point, depending on the information reported by the surveyors. Line observations were made along a township line or river segment and are spatially constrained by a clear beginning and ending, whereas point observations were made at precise points along township lines. Each line or point observation is associated with a list of tree taxa (*e.g.* fir, spruce, birch and a few cedar), which are ranked in order of decreasing importance in the forest cover. A validation study conducted in part in the Gaspé Peninsula and based on an early forest inventory recently indicated that surveyors ranked taxa in lists using criteria directly equivalent to the basal area of stems with DBH greater than three inches (7.62cm) (Terrail et al. 2014). Survey logbooks also contain mention of cover types (softwood, mixedwood, etc.) as well as mentions of recent disturbances (fire, windthrow, logging or settlement).

Data were georeferenced as lines or points using ArcGIS 10.0 (ESRI 2010) and modern cadastral maps built from early land surveys (scale 1: 20 000). The spatial uncertainty of 90% of the georeferenced observations is less than 10m, as determined by comparing the locations of permanent features (lakes and confined rivers) between the surveyors' logbooks and modern maps. Line and point observations were weighed by their

spatial importance in order to be integrated into the same database. In this respect, each point was weighted by its mean distance to the preceding and following observations and each line was weighted by its length (Dupuis et al. 2011).

### Analysis

The temporal period retained for analysis differed between the two ecozones, reflecting their differing settlement and survey histories (Fig. 1-2.). In order to reconstruct the presettlement forest composition prior to extensive anthropogenic disturbances, all 20th century observations were rejected in the temperate ecozone, whereas a later exclusion threshold of 1940 was considered for the boreal ecozone, corresponding to the onset of extensive logging. Considering these dates, 30 river surveys and 87 township surveys were retained for the analysis. Consequently, a total of 5409 line descriptions and 251 witness trees were retained for the temperate ecozone, compared to 6500 line descriptions and 2133 witness trees for the boreal ecozone (Table 1-1).

For each ecozone and each survey type (river vs township), the importance of each tree taxa in the presettlement forest was reconstructed from its relative frequency among witness tree observations, as well as using indices of taxa prevalence, taxa frequency and taxa dominance computed from line descriptions observations (Scull and Richardson 2007). For a given line description dataset, the prevalence of a taxon is the proportion of the total weight of taxa list in which the taxon was mentioned, whatever its rank in those lists, relative to the weight of all lists. Indices of taxa frequencies were computed separately for the first four ranking positions in taxa lists using the following formula:

$$F_{ir} = N_{ir} / M_r$$

where  $F_{ir}$  is the frequency of the taxon  $i$  at rank  $r$  ( $r = 1, 2, 3, 4$ ),  $N_{ir}$  is the total weight of all taxa list where the taxon  $i$  is listed at rank  $r$  and  $M_r$  is the total weight of all taxa list that mentioned at least  $r$  taxa. The dominance of a taxon refers to its frequency of occurrence in

the first ranking position (*i.e.* for  $r = 1$ ). The frequency of a taxon in the witness trees dataset is calculated by dividing the amount of witness trees identified to that taxon by the total amount of witness trees in the dataset.

Changes in forest composition between the presettlement and modern periods were evaluated by comparing indices of taxa prevalence, taxa frequency and taxa dominance between early land survey datasets ( $n = 11\,763$ , for both river and township surveys, boreal and temperate ecozones) and the four decadal forest inventories (1976, 1987, 2000 and 2008;  $n = 27\,521$ ) conducted by the Government of Québec (MFFP 2016). These inventories are intended to estimate the standing wood volume and are based on 0.04ha sampling plots randomly stratified per forest stand type. Unforested (agriculture, urban, etc.) and unproductive lands (marsh, peatlands, etc.) as well as inaccessible stands (slope  $> 40\%$ ) are excluded from the inventories. Within plots, individual stems are counted per species and 2cm DBH classes, thus allowing computation of the basal area by species. Species of the modern database were grouped to the genus level to match the taxa nomenclature used by surveyors (see Appendix S1-1). For each plot, taxa were then ranked by decreasing order of basal area to allow comparisons with the ranked taxa list of the surveyors using indices of taxa prevalence and dominance (Terrail et al. 2014, Dupuis et al. 2011). Because surveyors made visual estimations of relative taxa importance in forest stands, they may have overlooked the less important taxa at several sites, whereas all taxa occurring in each modern plot have been recorded, even at very low basal area. Consequently, only taxa contributing to the first 95% of the total basal area in modern plots were considered in comparisons between time-periods. Omitting these less important taxa resulted in very similar frequency distributions of taxa numbers in observations of the two time-periods (Fig. 1-3).

#### **I.2.4 Results**

The temperate and boreal ecozones display contrasted spatial and temporal data density patterns, as well as contrasted data types and survey types. The temperate ecozone mostly contains 19th century township line descriptions, whereas the boreal ecozone is densely covered with 20th century lines description and witness tree observations from both river and township surveys (Fig. 1-1 and 1-2, Table 1-1). In addition, whereas township observations correspond to a random sampling of the altitudinal gradient in both ecozones, river observations are largely overrepresented in lower slopes and valley bottoms and underrepresented in upper slopes positions (Fig. 1-4).

Reconstructions of presettlement forest composition based on taxa prevalence, taxa dominance or witness tree frequency are similar between survey types for the two ecozones (Fig. 1-5). Even weakly replicated reconstructions based on fewer than 200 observations, such as line descriptions from river surveys or witness trees from township surveys in the temperate ecozone (Table 1-1), are well correlated to the same reconstruction based on the alternate survey type (township *vs.* river).

Correlations between reconstructions based on river and township data are stronger for taxa prevalence ( $r = 0.96$ ; Fig. 1-5a) than for taxa dominance ( $r = 0.63$ ; Fig. 5b) or frequency in witness trees observations and ( $r = 0.76$ ; Fig. 5c). Balsam fir and spruce, the two most dominant taxa, show large difference of dominance and witness tree frequencies between river and township surveys (Fig. 1-5). Spruce is more dominant in river than in township data whereas balsam fir shows the reverse trend, being more dominant in the township data especially in the boreal ecozone.

Comparisons among data types indicate that tree taxa frequency in witness trees is a strong indicator of taxa dominance in line description data, for both ecozones and survey types (Fig. 1-6b, d). Some taxa were not observed as witness trees for township (larch, pine) surveys in the temperate ecozone, probably reflecting their low dominance, along with the low numbers of available witness trees observations (Table 1-1). When these taxa

are ignored, witness tree frequencies and taxa dominance are highly correlated ( $r = 0.97$  to  $0.99$  on log-transformed data; Fig. 1-6b, d). In contrast, witness tree frequency systematically underestimates taxa prevalence (Fig. 1-6a, c).

Township and river surveys, as well as line description and witness tree data, indicate a conifer dominated presettlement forest with balsam fir and spruces as the most prevalent and dominant taxa in both ecozones (Appendix S1-2). These two taxa were more prevalent (80-90% vs. 60-80%) and dominant (30-55% vs. 10-30%) in the boreal than the temperate ecozone. Conversely, secondary taxa were more prevalent (30-50% vs. 5-40%) and dominant (10-20% vs. 0-10%) in the temperate than in the boreal ecozone. Less important taxa (maples, pines, poplars) also tended to be more prevalent and dominant in the temperate than in the boreal ecozone. For example, the prevalence of maples and pines averaged 10-15% in the temperate ecozone compared to less than 2% in the boreal ecozone.

All datasets indicate that balsam fir and spruces were also the most important codominant taxa (rank = 2). The most important companion taxon (rank  $\geq 3$ ) was paper birch with prevalence up to 60% and 35% in the boreal and temperate ecozone, respectively (Appendix S1-2). Yellow birch and eastern white cedar were also important companion taxa in both ecozone, with frequencies ranging from 5% to 25%, but were mostly found in the temperate ecozone.

The comparisons of township and river survey observations to the modern data suggest larger postsettlement prevalence changes in the temperate than the boreal ecozone (Fig. 1-7a, b). The two survey types suggest prevalence changes in the same direction for all taxa except spruces, which experienced minor prevalence changes in both ecozones. The two most prevalent taxa, spruces and balsam fir, remained stable in both ecozones. Paper birch, maples and poplars increased in prevalence to the expense of eastern white cedar, yellow birch and pines in the temperate ecozone, whereas paper birch increased and eastern white cedar decreased in the boreal ecozone. Taxa that have increased in prevalence also increased in dominance (Fig. 1-7c, d), especially in the temperate ecozone.

### 1.2.5 Discussion

In this study, we compared reconstructions of presettlement forest composition using two different types of early land survey records (river and township surveys), also considering two data types (witness trees and line descriptions), in two ecozones (temperate and boreal) in eastern Canada. These comparisons allow the evaluation of the strengths of the databases and confirm that the data can provide robust reconstructions of presettlement forest composition.

The datasets present important differences, such as the number of observations (Table 1-1), their spatial and temporal distributions across the study area and along the altitudinal gradient (Fig. 1-2 and 1-4). However, despite these differences, values of taxa prevalence and dominance are highly correlated among datasets (Fig. 1-5 and 1-6). The main differences generally concern the taxa of secondary importance, probably because these taxa are associated with specific site conditions or stand history and therefore are more dependent of the sampling plan. The river surveys' dataset, for example, is biased by describing low elevation vegetation and is not comparable to the modern sampling plots (Fig. 1-4).

Taxa frequency obtained from witness trees data and taxa dominance obtained from line description data are strongly correlated, for both the river and township surveys, supporting the idea that taxa were ranked by importance in the forest cover. Surveyors generally noted only a single witness tree every 40 or 80 chains (approximately 800m and 1600m). Thus, the high dominance-witness tree correlation can be explained by the fact that each taxon selected as a witness tree was one of the most dominant taxa in its stand combined to the fact that taxa ranked first by surveyors were also the more dominant in the corresponding stand. If the surveyors had noted more than one witness tree at each observation point, as it is generally the case with the witness tree datasets of the United States (Bourdo 1956, Whitney 1994), then witness tree data would probably have been correlated to taxa prevalence.

Line descriptions are more useful, because they are more numerous than witness tree data (Table 1-1) and because they inform us on taxa dominance as well as taxa prevalence and frequency as companion taxa. Line description data also provide a better spatial coverage of the study area (Fig. 1-2), because all surveyor provided systematic and detailed line descriptions whereas only about a third of them noted witness trees in their notebooks. Similarly, township data seem to be more robust than river data, as suggested by higher correlations between taxa prevalence, dominance and witness tree frequency for township than with river data (Fig. 1-6). This is probably the consequence of the larger township dataset and its more representative sampling plan, as seen by the elevation distribution of the observation. River data, by describing mostly low elevation forest, underestimates balsam fir and overestimates spruces (Fig. 1-5), because hydric spruce-dominated stands are frequent in lowlands and near the rivers in the Gaspé Peninsula, while mesic balsam fir-dominated stands are the most frequent stand types in the mid to high elevation classes (Grondin 2000; Robitaille and Saucier 1998).

When using 100% of the basal area to derive taxa lists from modern plots, longer taxa lists were obtained as compared to the lists contained in the surveyors' notebook. For the boreal ecozone, modern plots contained an average of 2.86 taxa compared to 2.52 and 2.49 for the river and township line descriptions, respectively. This difference is even larger for the temperate ecozone, with 3.71 taxa per modern plots compared to 2.68 and 2.94 taxa for river and township line descriptions, respectively. These differences are most likely since surveyors overlooked the less important taxa, whereas all taxa occurring in modern plots were systematically recorded, even at very low basal area. Deriving modern taxa list from the first 95% of a plot basal taxa allowed comparing observations with similar frequency distribution of taxa number for the two time-periods (Fig. 1-3b and 1-3e). Conversely, when only taxa contributing to the first 90% of the basal area were considered (Fig. 1-3c and 1-3f) presettlement taxa list contained more taxa than the modern lists. Thus, the omitted taxa bias seems relatively unimportant, corresponding to taxa occupying a maximum of 5% of basal area. Alternatively, the longer taxa list of the modern dataset when all taxa are considered could mean that the present-day forest is more diverse than the presettlement

one, because recently disturbed (and thus younger) forest stands can be more diverse than old growth forest stands (Huston 1979; Petraitis et al. 1989).

Within each ecozone, the various datasets provide similar reconstruction of presettlement forest composition. The presettlement forest cover of the boreal ecozone was mostly coniferous with high prevalence and dominance of balsam fir and spruces, often associated with the moderately prevalent and rarely dominant paper birch. The temperate ecozone was also dominated by balsam fir and spruces, although less so than the boreal ecozone. Companion taxa, including eastern white cedar, yellow birch, maples and pines occurred at greater frequency as compared to the boreal ecozone. Such forest composition is similar to reconstructions in adjacent areas, such as the in the New-Brunswick located immediately in the south of the study area (Aubé 2008; Crossland 2006; Etheridge et al. 2005; Lutz 1997) in the Lower-Saint-Lawrence located immediately to the west of the study area (Boucher et al. 2006, 2009ab; Dupuis et al. 2011; Terrail et al. 2014) or in the north east United States located to the south-west of the study area (Cogbill et al. 2002; Lorimer 1977; Siccama 1971; Vadeboncoeur et al. 2012; Thompson et al. 2013).

Presettlement composition differences between river and township datasets are minor and can be attributed to autecology of the tree taxa. For example, eastern white cedar was more prevalent for river than township observations, which is coherent to its ability to regenerate and grow on poorly drained sites (Larouche 2006; Hébert 2007). Because the river and township survey datasets are independent, their similarity validates that the taxa were ranked according to their importance within stands.

The presettlement forest composition of the two ecozones reflects the biogeographic context of the study area, which is situated at the transition between the boreal and temperate ecozone. Species that were more abundant in the temperate than in the boreal ecozone, including eastern white cedar, yellow birch, pines and maples attain their northern range limit in the study area. Some thermophile species (species found at specific locations of the study area if their main range distribution is located south of the study area) were also found in the temperate ecozone but not in the boreal ecozone. This includes American

beech (*Fagus grandifolia* Ehrh.), American elm (*Ulmus americana* L.), black ash (*Fraxinus nigra* Marsh.), eastern hemlock (*Tsuga canadensis* (L.) Carrière) the red oak (*Quercus rubra* L.) (see Appendix S1-1 and S1-2). Conversely, balsam fir, spruces and paper birch, which are boreal taxa, with a geographical range distribution mostly located north of the study area, were all more prevalent and dominant in the boreal than in the ecozone. Such differences of forest composition between the two ecozones are still observable in the present-day forest.

Balsam fir and spruces display a strong resilience in the study area. These species were heavily logged in the 20th century, mostly used by the pulp industry (Desjardins et al. 1999) and were attacked by many insect outbreaks. During the 20th century, at least three spruce budworm outbreaks occurred, one spruce beetle outbreak (*Dendroctonus rufipennis* Kby.), one European spruce sawfly outbreak (*Gilpinia hercyniae* Htg.) and one hemlock looper outbreak (*Lambdina fiscellaria* Guen.) (Balch 1942a, b; Lachance *et al.* 1990). Despite these disturbances that targeted balsam fir and spruces, these taxa remained the most abundant and increased in dominance and prevalence.

Compositional changes documented here appear to be related to the disturbance history of the study area and the autecology of the tree taxa. Important exploitation of white pine (*Pinus strobus* L.) and red pine (*Pinus resinosa* Ait) occurred during the 19th century in the Gaspé Peninsula (Desjardins et al. 1999), which probably explains the decline of the pines measured. Many fires burnt the area in the 20th century and many clear cuts took place after the 1930s, which can explain the decline of eastern white cedar and yellow birch since these species are known for their poor regeneration following these disturbances (Bergeron and Charron 1994; Heitzman et al. 1997). The important increase in paper birch and trembling aspen can be explained by their high regeneration and growth after fires and clear-cutting (Bergeron 2000; Fortin 2008). Red maple (*Acer rubrum* L.) and sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) are also recognized as opportunistic species that have a good regeneration after stand replacing disturbances (Fei and Steiner 2009; Nolet et al. 2008).

Larger compositional changes occurred in the temperate than in the boreal ecozone. The temperate ecozone has a longer history of anthropogenic disturbances and has a more natural diversified composition. It has been occupied by Euro-American settlers for the past 200 years and has witnessed a complex history of compounded loggings, fires and settlements (Desjardins et al. 1999). In addition, some of the taxa that have the highest prevalence change (eastern white cedar, pines, yellow birch and maples) were all more prevalent in the temperate ecozone than in the boreal ecozone, offering a wider possibility of compositional changes.

### **1.2.6 Acknowledgements**

We thank Raphaële Terrail, Mariève Bouchard-Marmen, Sarah Desjardins and Myriane Houde-Poirier for their help in the database construction. Heather Boyle helped with the english translation. The study was financed by the FRQNT, the Chaire de Recherche sur la Forêt Habitée and the BOREAS Group.

### I.2.7 References

- Aubé, M. 2008. The pre-European settlement forest composition of the Miramichi River watershed, New Brunswick, as reconstructed using witness trees from original land surveys. *Canadian Journal of Forest Research* **38**(5): 1159-1183.
- Balch, R.E. 1942a. Estimation of forest insect damage with particular reference to *Dendroctonus piceaperda* (Hopk.). *Pulp and Paper Magazine of Canada Woodland Review Section*(November): 900-906.
- Balch, R.E. 1942b. The spruce sawfly outbreak in 1941. *Pulp and Paper Magazine of Canada Woodland Review Section*(April): 385-388.
- Bergeron, Y. and Charron, D. 1994. Postfire stand dynamics in a southern boreal forest (Québec): A dendroecological approach. *Écoscience* **1**(2): 173-184.
- Bergeron, Y. 2000. Species and stand dynamics in the mixed woods of Quebec's southern boreal forest. *Ecology* **81**(6): 1500-1516.
- Blais, J.R. 1961. Spruce budworm outbreaks in the Lower St. Lawrence and Gaspé regions. *The Forestry Chronicle* **37**(3): 192-202.
- Blais, J.R. 1983. Trends in the frequency, extent and severity of spruce budworm outbreaks in Eastern Canada. *Canadian Journal of Forest Research* **13**(4): 539-547.
- Blanchard, R. 1930. Études canadiennes : I. La presqu'île de Gaspé. *Revue de Géographie Alpine* **18**(1): 5-112.
- Boucher, Y., Arseneault, D. and Sirois, L. 2006. Logging-induced change (1930-2002) of a preindustrial landscape at the northern range limit of northern hardwoods, eastern Canada. *Canadian Journal of Forest Research* **36**(2): 505-517.

- Boucher, Y., Arseneault, D. and Sirois, L. 2009a. Logging history (1820-2000) of a heavily exploited southern boreal forest landscape: Insights from sunken logs and forestry maps. *Forest Ecology and Management* **258**(7): 1359-1368.
- Boucher, Y., Arseneault, D. Sirois, L. and Blais, L. 2009b. Logging pattern and landscape changes over the last century at the boreal and deciduous forest transition in Eastern Canada. *Landscape Ecology* **24**(2): 171-184.
- Boucher, Y., Saint-Laurent, M.-H. and Grondin, P. 2011. Logging-induced edge and configuration of old-growth forest remnants in the eastern North American boreal forests. *Natural Areas Journal* **31**(3): 300-306.
- Boucher, Y. and Grondin, P. 2012. Impact of logging and natural stand-replacing disturbances on high-elevation boreal landscape dynamics (1950-2005) in eastern Canada. *Forest Ecology and Management*, **263**(1): 229-239.
- Boucher, Y., Grondin, P. and Auger I. 2014. Land use history (1840-2005) and physiography as determinants of southern boreal forests. *Landscape Ecology*, **29**(3): 437-450.
- Boucher, Y., Perrault-Hébert, M., Fournier, R., Drapeau, P. and Auger, I. 2017a. Cumulative patterns of logging and fire (1940-2009): consequences on the structure of the eastern Canadian boreal forest. *Landscape Ecology*, **32**(2): 361-375.
- Boucher, Y., Auger, I., Noël, J., Grondin, P. and Arseneault, D. 2017b. Fire is a stronger driver of forest composition than logging in the boreal forest of eastern Canada. *Journal of Vegetation Science* **28**(1): 57-68.
- Boulanger, Y. and Arseneault, D. 2004. Spruce budworm outbreaks in eastern Quebec over the last 450 years. *Canadian Journal of Forest Research* **34**(5): 1035-1043.
- Boulanger, Y., Arseneault, D., Morin, H., Jardon, Y., Bertrand, P. and Dagneau, C. 2012. Dendrochronological reconstruction of spruce budworm (*Choristoneura fumiferana*)

- outbreaks in southern Quebec for the last 400 years. *Canadian Journal of Forest Research* **42**(7): 1264-1276.
- Bourdo, E.A. 1956. A review of the general land office survey and of its use in quantitative studies of former forests. *Ecology* **37**(4): 754-768.
- Brunet, G. 2002. Reconstitution historique de la sapinière à bouleau blanc vierge de la Côte-de-Gaspé. Faculté de Foresterie et de Géomatique. Université Laval, Québec.
- Bureau d'Aménagement de l'Est du Québec (BAEQ). 1966. Atlas régional du Bas-St-Laurent, de la Gaspésie et des Îles-de-la-Madeleine, Mont-Joli, Québec.
- Carleton, T.J. and MacLellan, P. 1994. Woody vegetation responses to fire versus clear-cutting logging: A comparative survey in the central Canadian boreal forest. *Écoscience* **1**(2): 141-152.
- Cogbill, C.V., Burk, J. and Motzkin, G. 2002. The forests of presettlement New England, USA: Spatial and compositional patterns based on town proprietor surveys. *Journal of Biogeography* **29**(10-11): 1279-1304.
- Crossland, D.R. 2006. Defining a forest reference condition for Kouchibouguac National Park and adjacent landscape in eastern New-Brunswick using four reconstructive approaches. Graduate Academic Unit of Forestry and Environmental Management. University of New-Brunswick, Fredericton.
- Cyr, D., Gauthier, S., Bergeron, Y. and Carcaillet, C. 2009. Forest management is driving the eastern North American boreal forest outside its natural range of variability. *Frontiers in Ecology and Environment* **7**(10): 519-524.
- Danneyyrolles, V., Arseneault, D. and Bergeron, Y. 2016a. Pre-industrial landscape composition patterns and post-industrial changes at the temperate-boreal forest interface in western Quebec, Canada. *Journal of Vegetation Science* **27**(3): 470-481.

- Danneyyrolles, V., Arseneault, D. and Bergeron, Y. 2016b. Long-term compositional changes following partial disturbance revealed by the resurvey of logging concession limits in the northern temperate forest of eastern Canada. *Canadian Journal of Forest Research* **46**(7): 943-949.
- Desjardins, M., Frenette, Y., Bélanger, J. and Héту, B. 1999. Histoire de la Gaspésie, deuxième édition. Institut Québécois de Recherche sur la Culture, Québec, Québec.
- Dupuis, S., Arseneault, D. and Sirois, L. 2011. Change from pre-settlement to present-day forest composition reconstructed from early land survey records in eastern Québec, Canada. *Journal of Vegetation Science* **22**(3): 564-575.
- Environment Canada. 2017. Canadian climate normals or averages 1971-2000. Meteorological service of Canada. Available at: <http://climate.weatheroffice.gc.ca/climate>. Accessed: 2017-01-16.
- ESRI. 2010. ArcGIS 10.0, Redlands, California.
- Etheridge, D.A., MacLean, D.A., Wagner, R.G. and Wilson, J., S. 2005. Changes in landscape composition and stand structure from 1945-2002 on an industrial forest in New-Brunswick, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* **35**(8): 1965-1977.
- Fei, S. and Steiner, K.C. 2009. Rapid capture of growing space by red maple. *Canadian Journal of Forest Research* **39**(8): 1444-1452.
- Fortin, S. 2008. Expansion postcoloniale du tremble (*Populus tremuloides*) dans le bassin de la rivière York, en Gaspésie. Département des sciences fondamentales. Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi.
- Foster, D.R. and Aber, J.D. 2004. Forests in time: The environmental consequences of 1,000 years of change in New England. Yale University Press, New Haven, Connecticut.

- Foster, D.R., Motzkin, G. and Slater, B. 1998. Land-use history as long-term broad-scale disturbance: Regional forest dynamics in central New England. *Ecosystems* **1**(1): 96-119.
- Fritschle, J.A. 2009. Pre-EuroAmerican settlement forests in Redwood National Park, California, USA: A reconstruction using line summaries in historic land surveys. *Landscape Ecology* **24**(6): 833-847.
- Fritschle, J.A. 2012. Identification of Old-Growth Forest Reference Ecosystems Using Historic Land Surveys, Redwood National Park, California. *Restoration Ecology* **20**(6): 679-687.
- Gauthier, S., Leduc, A., Harvey, B., Bergeron, Y. and Drapeau, P. 2001. Les perturbations naturelles et la diversité écosystémique. *Le Naturaliste canadien* **125**(3): 10-17.
- Gobeil, A.R. 1938. Dommages causés aux forêts de la Gaspésie par les insectes. Ministère des Terres et Forêts, Services d'entomologie. Province de Québec.
- Grondin, P., Blouin, J., Racine, P., D'Avignon, H. and Tremblay, S. 2000. Rapport de classification écologique du sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'est. Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Direction des inventaires forestiers, Québec.
- Harvey, B. and Bergeron, Y. 1989. Site patterns of natural regeneration following clear-cutting in northwestern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* **19**(11): 1458-1469.
- Harvey, B.D. and Brais, S. 2002. Effects of mechanized careful logging on natural regeneration and vegetation competition in the southeastern Canadian boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research* **32**(4): 653-666.

- Harvey, B.D., Leduc, A. and Bergeron, Y. 1995. Early postharvest succession in relation to site type in the southern boreal forest of Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* **25**(10): 1658-1672.
- Hébert, B. 2007. Caractérisation de la régénération et des lits de germination des semis de *Thuja occidentalis* dans une vieille cédrière en Gaspésie, Québec, Canada. Université du Québec à Chicoutimi. Chicoutimi.
- Heitzman, E., Pregitzer, K.S., Miller, R.O., Lanasa, M. and Zuidema, M. 1999. Establishment and development of northern white-cedar following strip clearcutting. *Forest Ecology and Management* **123**(2-3): 97-104.
- Huston, M.A. 1979. A general hypothesis of species diversity. *American Midland Naturalist* **113**(1): 81-101.
- Ilisson, T. and Chen, H.Y.H. 2009. Response of six boreal tree species to stand replacing fire and clearcutting. *Ecosystems* **12**(5): 820-829.
- International Union for Conservation of Nature (IUCN). 2008. Guidelines for applying protected area management categories. Dudley, N. (Ed). Gland, Switzerland.
- Jackson, S.M., Pinto, F., Malcolm, J.R. and Wilson, E.R. 2000. A comparison of pre-European settlement (1857) and current (1981-1995) forest composition in central Ontario. *Canadian Journal of Forest Research* **30**(4): 605-612.
- Johnson, E.A. and Miyanishi, K. 2012. The boreal forest as a cultural landscape. *Annals of the New York Academy of Sciences* **1249**: 151-165.
- Lachance, D., Monnier, C., Bérubé, J.-P. and Paquet, R. 1990. Insectes et maladies des forêts dans la région du Bas-Saint-Laurent/Gaspésie de 1936 à 1987. Ministère des Approvisionnement et Services Canada, Québec.

- Larouche, C. 2006. Raréfaction du thuya. In Grondin, P. and Cimon, A. Les enjeux de biodiversité relatifs à la composition forestière. Ministère des Ressources Naturelles de la Faune et des Parcs, Gouvernement du Québec, Québec.
- Larsen, C.P.S., Kronenfeld, B.J. and Wang, Y.C. 2012. Forest composition: more altered by future climate change than by Euro-American settlement in western New York and Pennsylvania? *Physical Geography* **33**(1): 3-20.
- Lauzon, È., Kneeshaw, D.D. and Bergeron, Y. 2007. Reconstruction of fire history (1680-2003) in Gaspesian mixedwood boreal forests of eastern Canada. *Forest Ecology and Management* **244**(1-3): 41-49.
- Le Groupe Dryade. 1986. Étude de l'importance du rôle écologique du feu dans les parcs nationaux de la région du Québec. Parcs Canada.
- Lévesque, F. 1997. Conséquences de la dynamique de la mosaïque forestière sur l'intégrité écologique du Parc National Forillon. Faculté de Foresterie et de Géomatique. Université Laval, Québec.
- Lorimer, C.G. 1977. The presettlement forest and natural disturbance cycle of northeastern Maine. *Ecology* **58**(1): 139-148.
- Lorimer, C.G. 2001. Historical and ecological roles of disturbance in eastern North American forests: 9,000 years of change. *Wildlife Society Bulletin* **29**(2): 425-439.
- Lutz, S.G. 1997. Pre-European settlement and present forest composition in Kings county, New Brunswick, Canada. Faculty of Forestry and Environmental Management. University of New-Brunswick, Fredericton.
- Mladenoff, D.J., White, M.A., Pastor, J. and Crow, T.R. 1993. Comparing spatial pattern in unaltered old-growth and disturbed forest landscapes. *Ecological Applications* **3**(2): 294-306.

- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). 2015. Norme de stratification écoforestière, quatrième inventaire écoforestier du Québec méridional. Direction des inventaires forestiers, Gouvernement du Québec, Québec.
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). 2016. Normes d'inventaire forestier, placettes-échantillons temporaires. Normes techniques. Direction des inventaires forestiers, Gouvernement du Québec, Québec.
- Nolet, P., Delagrange, S., Bouffard, D., Doyon, F. and Forget, E. 2008. The successional status of sugar maple (*Acer saccharum*), revisited. *Annals of Forest Science* **65**(2): 208-217.
- Nowacki, G.J. and Trianosky, P.A. 1993. Literature on old-growth forests of eastern North America. *Natural Areas Journal* **13**(2): 87-107.
- Petratis, P.S., Latham, R.E. and Niesenbaum, R.A. 1989. The maintenance of species diversity by disturbance. *The Quarterly Review of Biology*. **64**(4): 393-418.
- Pinna, S., Malenfant, A., Hébert, B. and Côté, M. 2009. Portrait forestier historique de la Gaspésie. Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Gaspé, Québec.
- Pinto, F., Rornaniuk, S. and Ferguson, M. 2008. Changes to preindustrial forest tree composition in central and northeastern Ontario, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* **38**(7): 1842-1854.
- Plourde, P.-Y. and Gagnon, R. 1996. Évaluation du cycle de feux dans le secteur sud du parc national Forillon. Laboratoire d'écologie végétale, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi.
- Richard, P.J.H. 1997. Récurrence naturelle des feux pendant les derniers 2000 ans dans la région du parc national Forillon, Gaspésie. Étude de potentiel de la méthode anthracologique dans le contexte gaspésien. Rapport de recherche présenté à Parcs Canada. Laboratoire Jacques Rousseau, Université de Montréal, Montréal.

- Robitaille, A. and Saucier, J.-P. 1998. Paysage régionaux du Québec méridional, Direction de la gestion des stocks forestiers et Direction des relations publiques, Ministère des Ressources Naturelles du Québec. Publication du Québec, Québec.
- Rowe, J.S. 1972. Forest regions of Canada. Canadian Forestry Service, Ottawa.
- Ruel, J.-C. 2000. Factors influencing windthrow in balsam fir forests: From landscape studies to individual tree studies. *Forest Ecology and Management* **135**(1-3): 169-178.
- Schulte, L.A and Mladenoff, D.J.. 2001. The original US public land survey records: Their use and limitations in reconstructing presettlement vegetation. *Journal of Forestry* **99**(10): 5-10.
- Scull, P.R. and Richardson, J.L. 2007. A method to use ranked timber observations to perform forest composition reconstruction from land survey data. *American Midland Naturalist* **158**(2): 446-460.
- Siccama, T.G. 1971. Presettlement and present forest vegetation in northern Vermont with special reference to Chittenden County. *American Midland Naturalist* **85**(1): 153-172.
- Suffling, R., Evans, M. and Perera, A. 2003. Presettlement forest in southern Ontario: Ecosystems measured through a cultural prism. *The Forestry Chronicle* **79**(3): 485-501.
- Terrail, R. 2013. Influence de la colonisation sur les transformations du paysage forestier depuis l'époque préindustrielle dans l'Est du Québec (Canada). Département de biologie, chimie et géographie. Université du Québec à Rimouski, Rimouski.
- Terrail, R., Arseneault, D. Fortin, M.-J., Dupuis, S., Boucher, Y. 2014 An early forest inventory indicates high accuracy of forest composition data in pre-settlement land survey records. *Journal of Vegetation Science* **25**(3): 691-702.

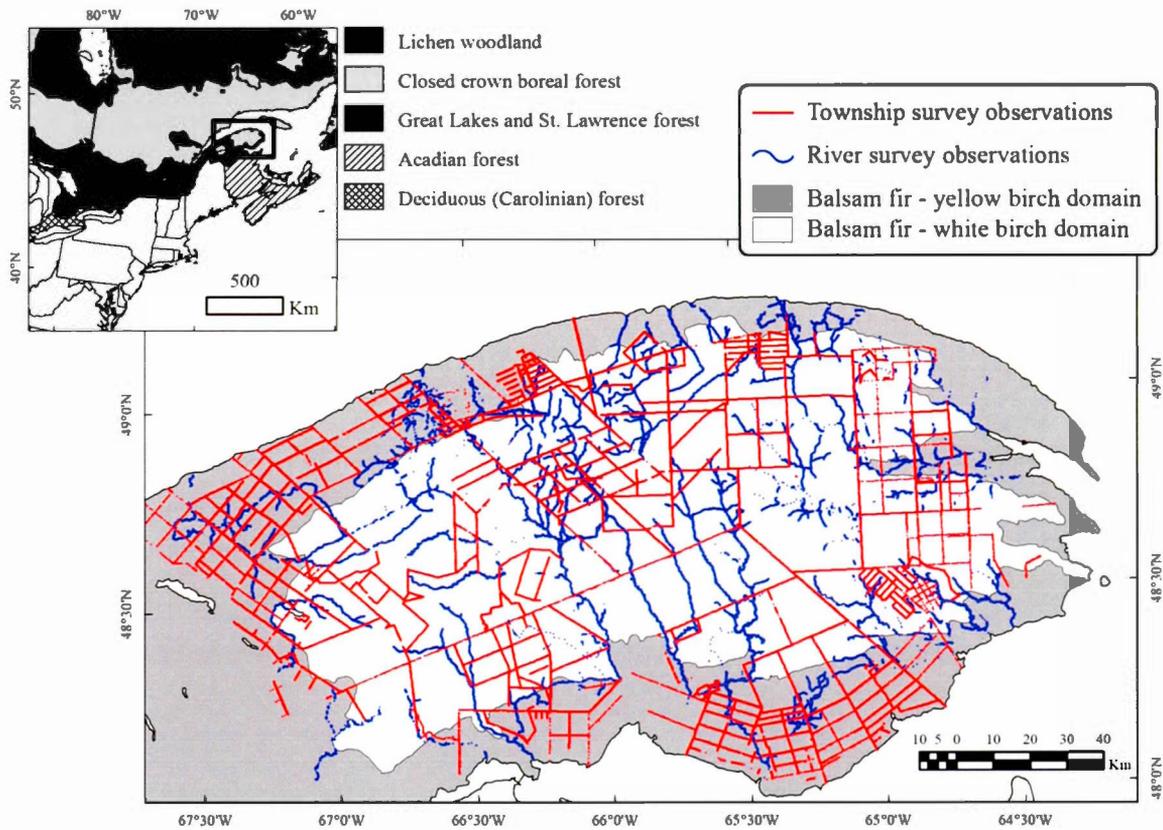
- Thompson, J.R., Carpenter, D.N., Cogbill, C.V. and Foster D.R. 2013. Four centuries of change in northeastern United States forests. *PLoS One* **8**(9): e72540.
- Tulowiecki, S.J. 2014 Using vegetation data within presettlement land survey records for species distribution modeling: A tale of two datasets. *Ecological Modelling* **291**(10): 109-120.
- Vadeboncoeur, M.A., Hamburg, S.P., Cogbill, C.V. and Sugimura, W.Y. 2012. A comparison of presettlement and modern forest composition along an elevation gradient in central New Hampshire. *Canadian Journal of Forest Research* **42**(1): 190-202.
- Weir, J.M.H. and Johnson, E.A. 1998. Effects of escaped settlement fires and logging on forest composition in the mixedwood boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research* **28**(3): 459-467.
- Whitney, G.G. 1994. From coastal wilderness to fruited plain: A history of environmental change in temperate North America, 1500 to the present. Cambridge University Press, Cambridge.

## I.2.8 Tables

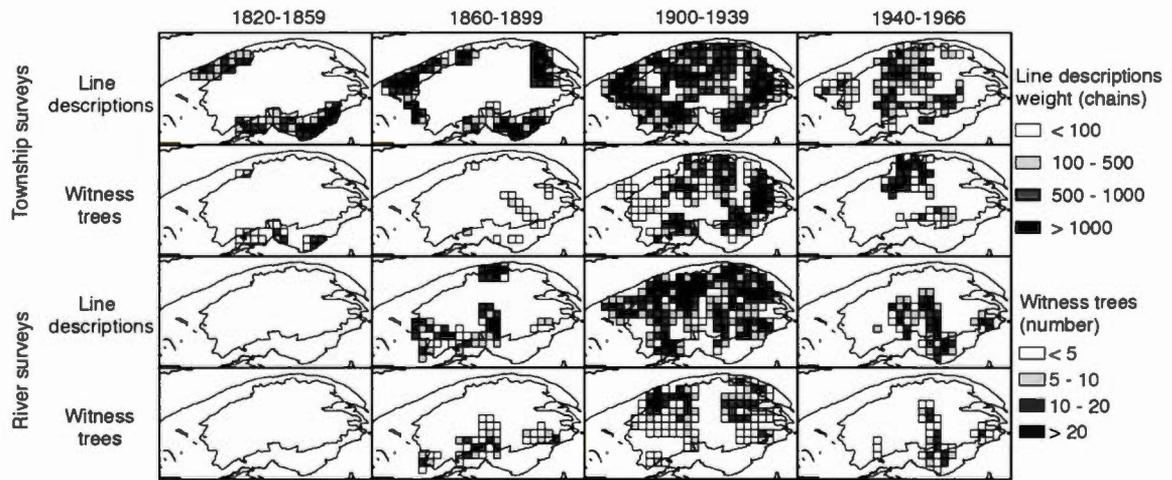
**Table 1-1.** Number of available observations per survey type and ecozone. LD: line description; WT: witness trees. Observations subsequent to 1900 and 1940 are excluded from the temperate and boreal datasets, respectively.

	Township		River	
	LD	WT	LD	WT
Temperate (<1900)	5221	144	188	107
Boreal (<1940)	4105	1306	2395	827
<b>Total</b>	<b>9276</b>	<b>1450</b>	<b>2487</b>	<b>934</b>

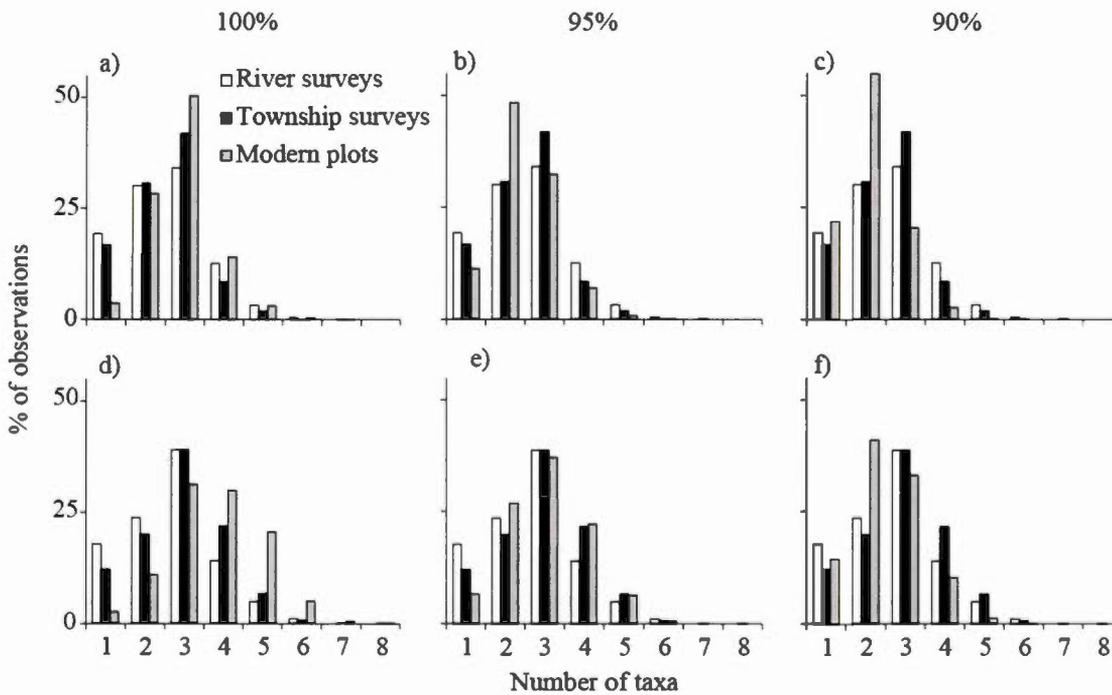
## I.2.9 Figures



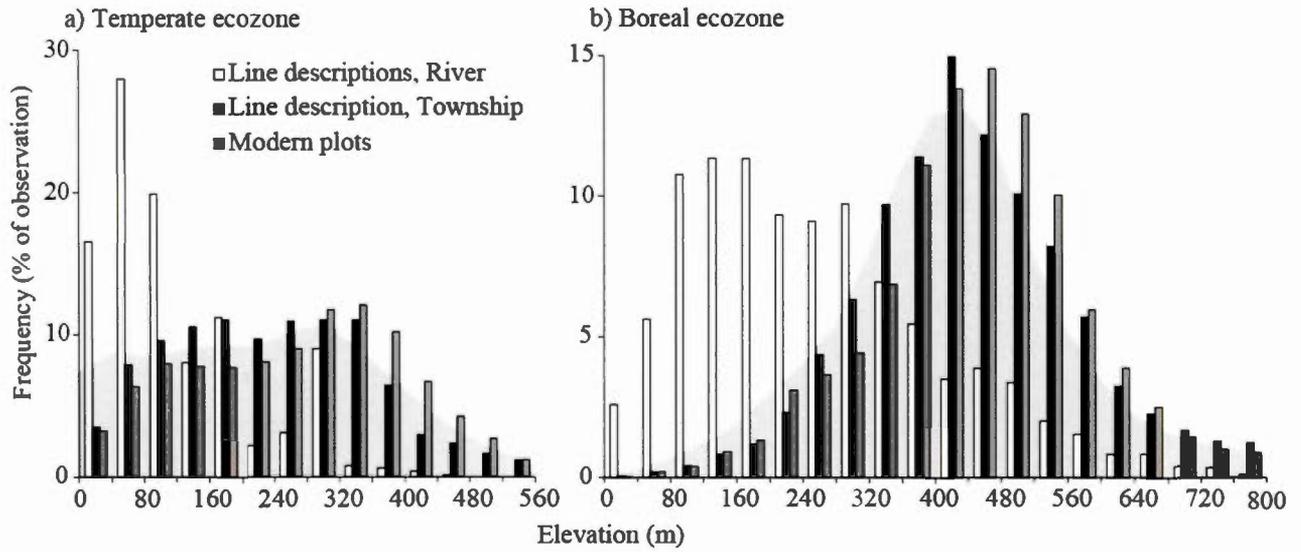
**Fig. 1-1.** Location of the study area in eastern Canada and delineation of the temperate and boreal ecozones. Forest zones in the top left inset are from the Canadian forest classification system (Rowe 1972). The balsam fir-yellow birch (*i.e.* the temperate ecozone) and the balsam fir-white birch bioclimatic domain (boreal ecozone) are from the Québec forest classification system (Robitaille and Saucier 1998).



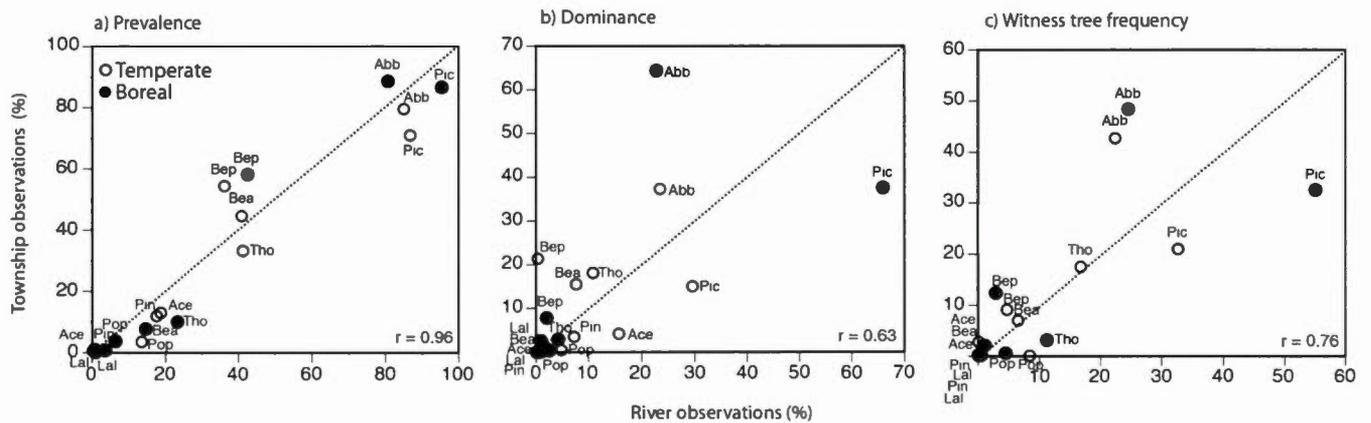
**Fig. 1-2.** Total weight of line description and frequency of witness tree observations by survey type (township vs. river) for each ecozone and four time-periods over the last two centuries. The weight of a line description observation corresponds to its spacing from adjacent observations or its length (see method). Weights and frequencies are compiled using a grid of 268 - 10km × 10km cells. The weight is in chains, which is the unit used by the surveyors (1 chain = 20.12m). For the temperate ecozone, data before 1900 (the first two columns) were retained for analysis; for the boreal ecozone, data before 1940 (the first three columns) were retained for analysis. Data shown in the fourth column were not used in subsequent analysis.



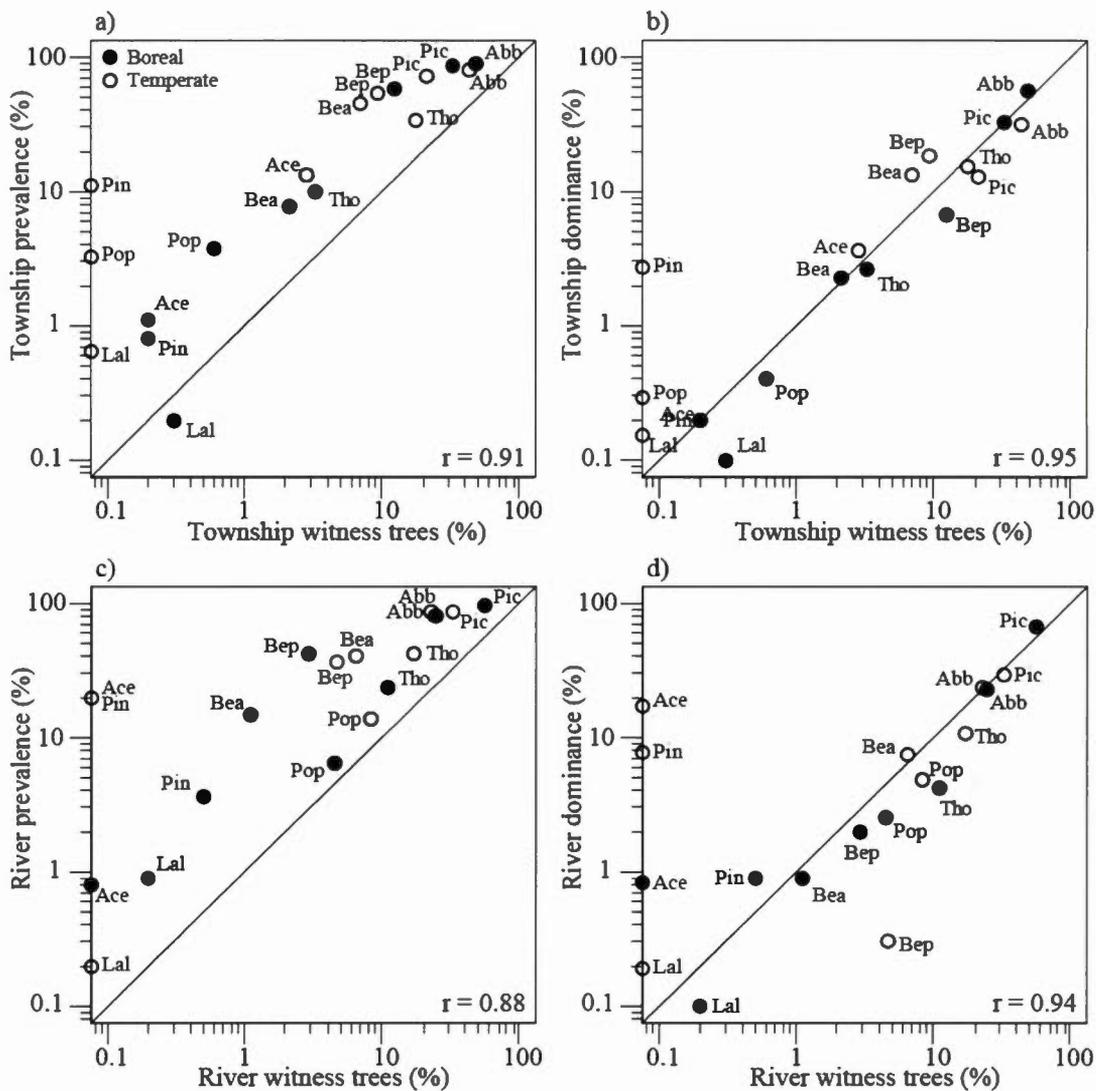
**Fig. 1-3.** Frequency distributions of the number of taxa listed by surveyors in line description observations along rivers and township lines and comparison with the number of taxa in modern survey plots for the boreal (a, b, c) and temperate ecozones (d, e, f). For each modern plot, we considered either all taxa present (a, d), only taxa composing the first 95% (b, e) or the first 90% (c, f) of the total basal area, beginning with the most dominant taxon.



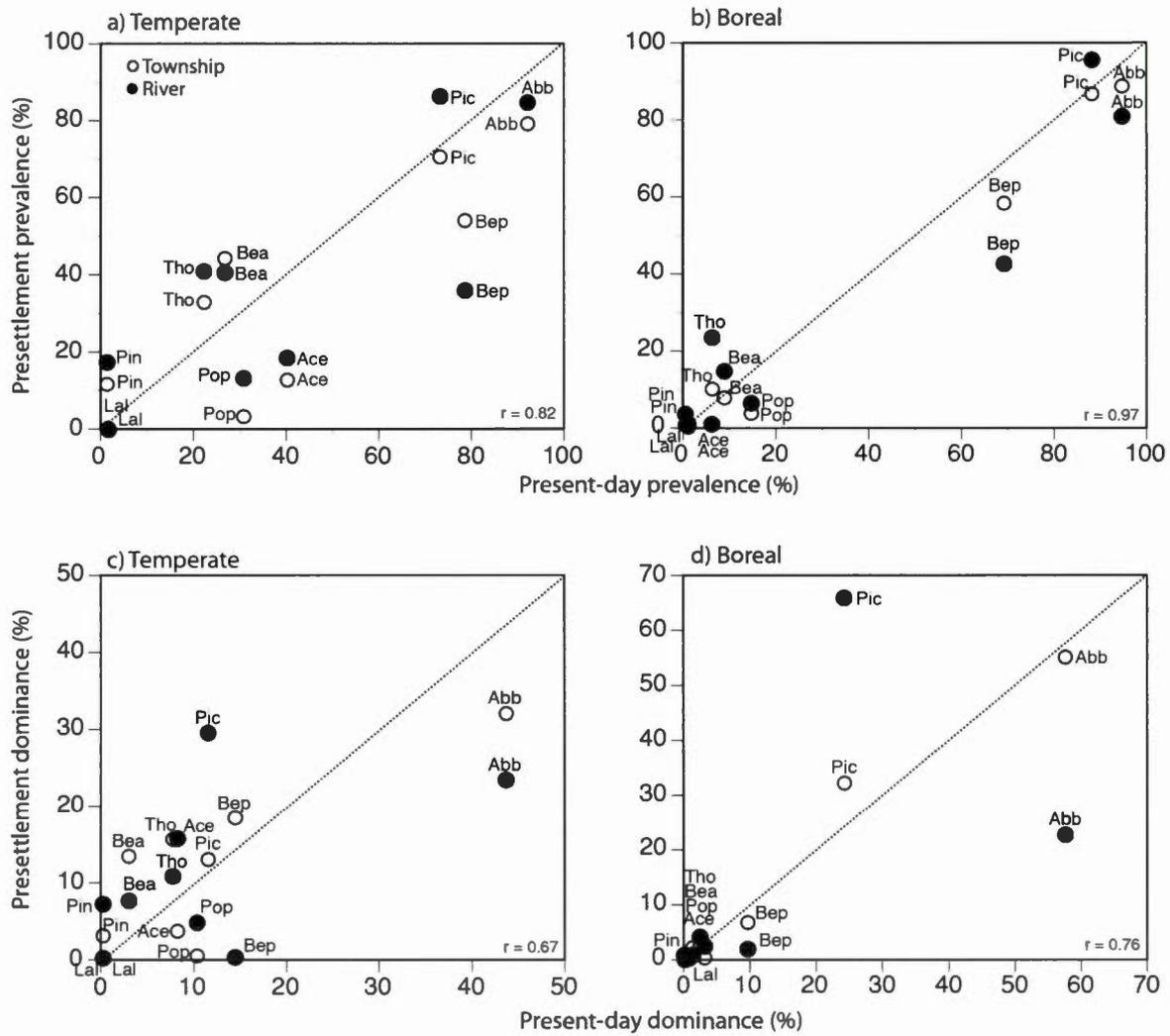
**Fig. 1-4.** Frequency distributions of line description and modern data by elevation classes, per survey types (river vs. township) in the temperate ecozone (a) and in the boreal ecozone (b). The gray shape in the background indicates the frequency distributions of the elevation classes across the study area.



**Fig. 1-5.** Comparison of taxa importance between the river and township survey, using indices of taxa prevalence (a), taxa dominance (b), and witness tree frequency (c). Abb: *Abies balsamea*; Pic: *Picea* spp.; Tho: *Thuja occidentalis*; Pin: *Pinus* spp.; Lal: *Larix laricina*; Bep: *Betula papyrifera*; Bea: *Betula alleghaniensis*; Pop: *Populus* spp.; Ace: *Acer* spp.; Oth: Other.



**Fig. 1-6.** Comparison of taxa prevalence (a, c) and dominance (b, d) between line description and witness tree observations for the temperate and boreal ecozones. Taxa abbreviations are given in Fig 1-5.



**Fig. 1-7.** Comparison of taxa prevalence (a, b) and dominance (c, d) between line descriptions and modern plots. Taxon abbreviations are given in Fig 1-5.

## I.2.10 Appendix

**Table 1-S1.** Terms and expressions found in surveyors' logbooks and correspondence to taxon names and expressions used in this study.

Term or expression	Frequency	Weight (chains*)	Taxon inferred	Expression used in this study
Alders	45	402.31	<i>Alnus</i> spp. Mill.	Others **
Ash	29	398.47	<i>Fraxinus nigra</i> Marsh.	Others
<i>Aulne</i>	576	12 936.39	<i>Alnus</i> spp. Mill.	Others **
Balm of gilead	6	51.2	<i>Abies balsamea</i> (L.) Mill.	Balsam fir
Balsam	11	175.16	<i>Abies balsamea</i> (L.) Mill.	Balsam fir
Beech	4	51.89	<i>Fagus grandifolia</i> Ehrh.	Others
Birch	1181	19 138.29	<i>Betula alleghaniensis</i> Britt.	Yellow birch
Black birch	55	832.76	<i>Prunus</i> spp. L.	Others **
Black spruce	56	883.83	<i>Picea mariana</i> (Mill) B.S.P.	Spruces
<i>Bois blanc</i>	118	2353.47	<i>Populus</i> spp. L.	Poplars
<i>Bois barré</i>	4	49.64	<i>Acer pensylvanicum</i> L.	Others **
<i>Bois buck</i>	30	431.84	<i>Acer spitacum</i> Lam.	Others **
<i>Bouleau</i>	7429	211 368.73	<i>Betula papyrifera</i> Marsh.	Paper birch
<i>Bouleau blanc</i>	5	129.87	<i>Betula papyrifera</i> Marsh.	Paper birch
<i>Bouleau gris</i>	1	13.00	<i>Betula papyrifera</i> Marsh.	Paper birch
<i>Bouleau rouge</i>	1	13.00	<i>Betula alleghaniensis</i> Britt.	Yellow birch
Cedar	784	9603.88	<i>Thuja occidentalis</i> L.	Eastern white cedar
<i>Cèdre</i>	3238	90 409.81	<i>Thuja occidentalis</i> L.	Eastern white cedar
<i>Cerisier</i>	28	513.83	<i>Prunus</i> spp. L.	Others **
<i>Cormier</i>	119	2079.35	<i>Sorbus americana</i> Marsh.	Others **
<i>Coudrier</i>	22	309.31	<i>Corylus cornuta</i> Marsh.	Others **
<i>Cyprès</i>	2	13.24	<i>Pinus banksiana</i> Lam.	Pines
Elm	4	20.25	<i>Ulmus americana</i> L.	Others
<i>Épinette</i>	11 578	308 460.24	<i>Picea</i> spp. Mill	Spruces
<i>Épinette blanche</i>	377	9126.56	<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	Spruces
<i>Épinette de savanne</i>	5	169.68	<i>Picea</i> spp. Mill	Spruces
<i>Épinette grise</i>	148	2437.33	<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	Spruces
<i>Épinette jaune</i>	2	32.74	<i>Picea</i> spp. Mill	Spruces
<i>Épinette noire</i>	779	22 272.33	<i>Picea mariana</i> (Mill) B.S.P.	Spruces
<i>Épinette rouge</i>	49	1035.51	<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	American larch
<i>Érable</i>	494	11 606.04	<i>Acer</i> spp. L.	Maples
<i>Érable batard</i>	2	8.77	<i>Acer spitacum</i> Lam.	Others
Fir	2541	34 372.18	<i>Abies balsamea</i> (L.) Mill.	Balsam fir

<i>Framboisier</i>	1	12.01	<i>Rubus idaeus</i> L.	Others **
<i>Frêne</i>	58	1375.61	<i>Fraxinus nigra</i> Marsh.	Others
<i>Hart</i>	18	625.87	Bushes?	Others **
<i>Hart rouge</i>	44	1035.83	<i>Cornus stolonifera</i> Michx.	Others **
Hazelnut	6	35.00	<i>Corylus cornuta</i> Marsh.	Others **
Hemlock	1	10.03	<i>Tsuga canadensis</i> (L.) Carrière	Others
<i>Hêtre</i>	2	192.22	<i>Fagus grandifolia</i> Ehrh.	Others
Juniper	13	173.71	<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	American larch
<i>Liard</i>	3	34.97	<i>Populus deltoides</i> Bartr. ex Marsh.	Poplars
Maple	308	4022.81	<i>Acer</i> spp. L.	Maples
<i>Mélèze</i>	55	1256.86	<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	American larch
<i>Merisier</i>	2430	70 315.58	<i>Betula alleghaniensis</i> Britt.	Yellow birch
Mix birches	89	1022.59	<i>Betula alleghaniensis</i> Britt. and <i>Betula papyrifera</i> Marsh.	Yellow birch and paper birch
Mountain ash	9	139.25	<i>Sorbus americana</i> Marsh.	Others **
<i>Orme</i>	14	951.31	<i>Ulmus americana</i> L.	Others
<i>Chêne</i>	1	12.01	<i>Quercus rubra</i> L.	Others
<i>Petite merise</i>	4	41.27	<i>Prunus</i> spp. L.	Others **
<i>Peuplier</i>	123	2768.41	<i>Populus</i> spp. L.	Poplars
<i>Pin</i>	292	10 357.72	<i>Pinus</i> spp. L.	Pines
<i>Pin blanc</i>	18	876.00	<i>Pinus strobus</i> L.	Pines
<i>Pin rouge</i>	3	78.70	<i>Pinus resinosa</i> Ait.	Pines
<i>Pin gris</i>	6	22.00	<i>Pinus banksiana</i> Lam.	Pines
Pine	383	6068.12	<i>Pinus</i> spp. L.	Pines
<i>Plaine</i>	42	1055.45	<i>Acer rubrum</i> L.	Maples
Poplar	153	2288.92	<i>Populus</i> spp. L.	Poplars
Red birch	11	144.73	<i>Betula alleghaniensis</i> Britt.	Yellow birch
Red spruce	1	9.50	<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	American larch
<i>Saint-Michel</i>	46	1337.10	<i>Abies balsamea</i> (L.) Mill.	Balsam fir
<i>Sapin</i>	12 275	319 723.89	<i>Abies balsamea</i> (L.) Mill.	Balsam fir
<i>Saule</i>	10	128.68	<i>Salix</i> spp. L.	Others **
Spruce	1162	15 405.64	<i>Picea</i> spp. Mill	Spruces
Sycamore	60	657.75	<i>Acer</i> spp. L.	Maples
Tamarack	16	223.39	<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	American larch
<i>Tremble</i>	541	20 563.77	<i>Populus tremuloides</i> Michx.	Poplars
White birch	979	13 552.79	<i>Betula papyrifera</i> Marsh.	Paper birch
White maple	11	173.98	<i>Acer saccharinum</i> L.	Maples
White spruce	12	210.73	<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	Spruces
White wood	53	481.71	<i>Populus</i> spp. L.	Poplars
Yellow birch	93	1299.74	<i>Betula alleghaniensis</i> Britt.	Yellow birch

Yellow pine	4	153.59	<i>Pinus strobus</i> L.	Pines
<i>Bois franc</i> or <i>Bois dur</i> or hardwood	130	3914.48	Hardwood cover type	Not considered
<i>Bois mêlé</i> or mixedwood	819	18 521.20	Mixedwood cover type	Not considered
<i>Bois mou</i> or softwood	207	6706.31	Softwood cover type	Not considered
<i>Savanne</i>	277	5909.06	Wetland	Not considered
Swamp or Marsh	262	3635.73	Wetland	Not considered
<i>Brûlé</i> or burnt	1213	42 951.36	Past fire disturbance	Not considered
<i>Bûché</i> or logged	852	26 171.76	Past logging disturbance	Not considered
<i>Renversé</i> or <i>cassé</i> or windfall	1001	21 954.67	Past windthrow disturbance	Not considered
<i>Champ</i> or field or Cleared land	298	94 051.93	Cleared, settled land	Not considered

\* : unit used by the surveyors. 1 chain = 20.1168 meters

\*\* : bushes taxa, not considered in analysis

**Table 1-S2.** Taxa frequency among witness tree observations and for the first four ranking positions of line description observations. Taxa prevalence refers to the frequency of occurrence of taxa among all line description observations regardless of their ranking position.

	Temperate ecozone (TE)						Boreal ecozone (BE)					
	Witness trees	Ranks				Total prevalence	Witness trees	Ranks				Total prevalence
		1	2	3	4			1	2	3	4	
<b>River surveys</b>												
Balsam fir	22.4	23.4	43.6	17.2	5.7	85.1	24.6	22.7	63.2	7.0	3.4	80.8
Spruces	32.7	29.5	30.0	19.0	15.4	86.8	55.0	65.9	28.8	9.3	2.5	95.5
Eastern white cedar	16.8	10.8	12.5	12.9	10.5	41.4	11.2	4.2	2.7	17.0	23.4	23.4
Pines	0.0	7.2	0.0	0.0	0.0	17.7	0.5	0.9	0.4	0.0	0.8	3.6
American larch	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.1	0.5	0.3	1.1	0.9
Paper birch	4.7	0.3	1.0	35.2	17.6	36.3	2.9	2.0	2.5	54.0	36.3	42.6
Yellow birch	6.5	7.6	9.8	9.5	45.2	41.0	1.1	0.9	1.0	9.6	23.8	14.7
Poplars	8.4	4.8	3.2	2.8	5.5	13.6	4.5	2.5	0.9	2.2	6.9	6.4
Maples	0.0	15.7	0.0	3.4	0.0	18.8	0.0	0.8	0.0	0.3	0.0	1.0
Others	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.1	1.8	0.7
<b>Township surveys</b>												
Balsam fir	42.7	32.0	32.7	17.8	14.3	79.6	48.4	55.2	33.2	7.5	8.0	88.7
Spruces	21.0	13.0	29.3	31.8	20.0	71.0	32.6	32.3	47.4	20.6	11.2	86.7
Eastern white cedar	17.5	15.6	6.3	7.3	12.3	33.3	3.2	2.6	1.7	5.5	21.1	10.1
Pines	0.0	3.1	1.4	2.6	5.9	12.0	0.2	0.2	0.1	0.3	1.3	0.8
American larch	0.0	0.2	0.3	0.1	0.0	0.6	0.3	0.1	0.1	0.1	0.0	0.2
Paper birch	9.1	18.4	14.3	23.6	15.3	54.4	12.4	6.8	14.2	60.3	27.0	58.3
Yellow birch	7.0	13.4	12.3	12.6	21.8	44.7	2.1	2.3	1.5	4.4	16.6	7.8
Poplars	0.0	0.5	0.7	0.7	3.9	3.6	0.6	0.4	1.5	1.2	12.0	3.8
Maples	2.8	3.7	2.4	3.3	6.1	13.1	0.2	0.2	0.3	0.1	2.6	1.1
Others	0.0	0.0	0.2	0.3	0.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
<b>Modern plots</b>												
Balsam fir		43.7	24.6	17.4	13.0	92.5		57.6	25.5	12.1	18.8	94.6
Spruces		11.6	20.6	26.4	23.2	73.6		24.3	40.3	29.5	18.3	88.1
Eastern white cedar		7.8	4.3	4.4	5.6	22.7		2.5	1.1	2.1	3.8	6.3
Pines		0.3	0.4	0.4	0.7	1.8		0.1	0.1	0.2	0.4	0.5
American larch		0.3	0.5	0.6	0.6	2.1		0.2	0.6	0.4	0.3	1.1
Paper birch		14.5	25.8	23.3	23.7	79.0		9.7	23.8	44	26.5	69.1
Yellow birch		3.1	6.8	8.8	10.2	27.2		1.4	2.6	3.8	9.2	8.9
Poplars		10.4	7.6	7.4	7.7	31.2		3.2	4.9	5.6	13.6	14.7
Maples		8.3	9.1	11.3	14.5	40.6		0.9	1.2	2.2	8.9	6.2
Others*		0.1	0.3	0.3	0.8	1.9		0.0	0.0	0.0	0.2	0.2

\* Other tree taxa: Ashes, American beech, American elm, oaks or eastern hemlock. Bush taxa are not considered

**CHAPITRE II**  
**TRANSFORMATION DE LA FORÊT PRÉINDUSTRIELLE DE LA**  
**PÉNINSULE GASPÉSIENNE, EST DU CANADA : IMPACT DES**  
**PERTURBATIONS ANTHROPIQUES EN L'ABSENCE DE**  
**RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE**

**II.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE**

Ce deuxième article, intitulé « *Transformation of the presettlement forest composition in the Gaspé Peninsula, eastern Canada: Impacts of anthropogenic disturbances in absence of warming trend* » a été rédigé par moi-même et par le professeur Dominique Arseneault. Cet article est écrit en langue anglaise et formaté en vue d'une publication dans la revue *Global Change Biology*. En date du dépôt de cette thèse, cet article n'a pas été soumis à la revue.

La composition forestière a changé depuis l'époque préindustrielle en Amérique du Nord. Ces changements sont probablement la conséquence des perturbations anthropiques et des changements climatiques, mais les contributions relatives de ces deux facteurs demeurent mal comprises et controversées. La péninsule gaspésienne est une région montagneuse de l'est du Canada, située à la transition entre les écozones de forêt boréale et de forêt tempérée, où plusieurs espèces arborescentes atteignent leurs limites de distributions altitudinale et latitudinale. Plusieurs perturbations anthropiques (colonisation, incendies et exploitation forestière) ont affecté la région au cours du dernier siècle mais la température est demeurée stable, offrant ainsi la possibilité d'étudier l'impact des perturbations anthropiques en absence de réchauffement climatique. La composition

forestière préindustrielle a été reconstituée à partir d'archives d'arpentage primitif puis comparée à des placettes d'inventaire forestier modernes. La forêt préindustrielle était composée surtout de sapin baumier et d'épinettes, souvent associées au bouleau à papier, au bouleau jaune et au thuya occidental. Les modifications de composition observées sont similaires à celles observées ailleurs dans la forêt tempérée nord-américaine et consistent en une augmentation du bouleau à papier, du peuplier faux-tremble et des érables, au détriment du thuya occidental, des pins et du bouleau jaune. Ces changements de composition sont spatialement associés aux feux et aux coupes forestières du XX<sup>e</sup> siècle, tandis que la limite altitudinale est demeurée stable pour tous les taxons. Nous en concluons que les perturbations anthropiques du XX<sup>e</sup> siècle sont suffisantes pour causer d'importants changements de composition dans la forêt tempérée, en l'absence de réchauffement climatique.

Mot clés : Écologie forestière historique, Écologie des perturbations, Perturbations anthropiques, Changement climatique, Archives d'arpentage primitif, Forêt boréale, Forêt tempérée

## **II.2 TRANSFORMATION OF THE PRESETTLEMENT FOREST COMPOSITION IN THE GASPÉ PENINSULA, EASTERN CANADA: IMPACTS OF ANTHROPOGENIC DISTURBANCES IN ABSENCE OF WARMING TREND**

### **II.2.1 Abstract**

Forest composition has changed since the presettlement period across North America. These changes are thought to be largely the consequence of anthropogenic disturbances and climate change, but the relative contribution of these two factors is poorly understood and still debated. The Gaspé Peninsula is a mountainous region of eastern Canada, located at the transition between the boreal and the temperate ecozones, where several taxa attain both their latitudinal and altitudinal limits. Anthropogenic disturbances (settlement, fire and forestry practices) have affected this region over the past 100 years but temperature remained stable over that period, offering the opportunity of studying the impacts of disturbances in the absence of a warming trend. The presettlement forest composition was reconstructed using early land survey records. Surveyors' observations ( $n = 16\,879$ ; 1820-1940) were georeferenced and compared to modern forest inventory plots ( $n = 27\,521$ ; 1976-2008). The presettlement forest was comprised mostly of balsam fir and spruces, often associated with paper birch, yellow birch and eastern white cedar. Our data reveal compositional changes similar to those observed elsewhere in the northern part of the North American temperate biome. Paper birch, trembling aspen and maples increased in prevalence, whereas eastern white cedar, pines and yellow birch decreased. These compositional changes are spatially associated with the 20th century fire and logging disturbances, whereas the latitudinal limits of all taxa remained stable. We conclude that anthropogenic disturbances alone are sufficient to cause compositional similar to those reported for most of the temperate forests of northeastern North America.

Keywords: Historical forest ecology, Disturbance ecology, Anthropogenic disturbances, Climate change, Early land survey records, Boreal forest, Temperate forest

## II.2.2 Introduction

Climate change and anthropogenic disturbances are both important causes of recent compositional changes in forest ecosystems (Gimmi *et al.*, 2010; Fisichelli *et al.*, 2014; Nowacki & Abrams, 2015; Plieninger *et al.*, 2016; Strahan *et al.*, 2016; Vayreda *et al.*, 2016). For example, the current global warming has caused shifts of forest ecotone upward (Beckage *et al.*, 2008) and has displaced species ranges northward on a continental scale (Iverson & Prasad, 1998; Boisvert-Marsh *et al.*, 2014; Nowacki & Abrams, 2015). For every 1°C of temperature change, tree species migration of ~145km of latitude or 167m of altitude is expected (Jump *et al.*, 2009). On the other hand, disturbances have also been identified as important causes of large scale vegetation changes, such as logging (Bouchard & Pothier, 2011; Boucher *et al.*, 2006; 2014), insect outbreaks (Duchesne & Ouimet, 2008) and fire (Bowman *et al.*, 2011; Terrail, 2013; Boucher *et al.*, 2017). Post-disturbance forests are generally composed of a greater proportion of fast growing and opportunistic species as compared to old-growth stands (Huston, 1979; Petraitis *et al.*, 1989).

In addition, simulations (Keane *et al.*, 2015) and observations (Krankina *et al.*, 2005) suggest that climate change and disturbances have synergistic effects. For example, forest succession following stand replacing disturbances, such as clear-cutting of fire, can have different trajectories with different climates (Wang *et al.*, 2015). Also, future climate projections suggest that fire regimes may change in several regions. Forest composition changes are expected in such regions as a consequence of climate changes, disturbance regime changes and the combination of both (Turner, 2010; Boulanger *et al.*, 2013; 2014). In this context, discerning the relative contribution of both factors can be challenging.

Instrumental data show that temperatures and precipitations have remained stable in eastern Québec over the last 50 years (Yagouti *et al.*, 2008). At the same time, many anthropogenic disturbances have occurred, giving the opportunity to study the impact of anthropogenic disturbances in the absence of warming trends. In addition, the Gaspé Peninsula offers an interesting biogeographic context. The region is located at the transition

between the temperate and the boreal ecozones and comprises high hills with strong vegetation gradients. Consequently, some tree species attain both their latitudinal and altitudinal limit in the region. In this context, tree species ranges are expected to have remained stable along the altitudinal gradient because of the stable climate. Conversely, the relative abundance of tree species is expected to have been modified by 20th century disturbances, favoring disturbances-adapted species to the expense of late successional species.

Compositional changes since the presettlement period have been previously documented in the Gaspé Peninsula (Lévesque, 1997; Brunet, 2002; Fortin, 2008; Pinna *et al.*, 2009). These changes are generally the same as documented elsewhere in the North American temperate ecozone (Cogbill *et al.*, 2002; Friedman & Reich, 2005; Dupuis *et al.*, 2009; Thompson *et al.*, 2013; Boucher *et al.* 2017) and consist in an increase in paper birch (*Betula papyrifera* Marsh.), trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx.) and maples (*Acer* spp. L.) at the expense of pines (*Pinus* spp. L.), eastern white cedar (*Thuja occidentalis* L.) and yellow birch (*Betula alleghaniensis* Britt.). However, these previous reconstructions were not spatially explicit and therefore the spatial and altitudinal components of these forest compositional changes, as well as eventual link with disturbances, remain unknown.

The main objective of this study is to study forest compositional changes and the disturbance history of the Gaspé Peninsula, in the context of its stable climate. The specific objectives are 1- to reconstruct the presettlement forest composition; 2- to compare the presettlement tree taxa spatial and altitudinal distribution to the present-day distribution; 3- to map the 20th century anthropogenic disturbances and to verify if the modern tree taxa abundance is spatially correlated to these disturbances. This study should help us understand the impacts of disturbances in the absence of warming trends and thus clarify the relative role of these two global change agents on changing forest composition.

### II.2.3 Materials and methods

#### Study area

The Gaspé Peninsula (26 500km<sup>2</sup>), in eastern Québec (Canada), is a mountainous region within the Appalachian geological formation (Fig. 2-1). The terrain consists of roundly shaped mounts and hills, large plateaus and deep valleys, with steep slopes and high elevation gradients. The mean and maximum elevations are 450m and 1270m, respectively. Lowlands (<200m) are located at the outer fringe of the peninsula and correspond to the northern limit of the temperate ecozone, which belongs to the Great Lakes-St. Lawrence forest region (Rowe, 1972). Conversely, the inner highlands correspond to the southern limit of the boreal forest. According to the Québec's classification system, the temperate ecozone of the study area corresponds to the balsam fir-yellow birch bioclimatic domain, while the boreal ecozone area corresponds to the balsam fir-white birch domain (Robitaille & Saucier 1998).

The climate is cold and wet, with mountainous and maritime influences. The Murdochville's meteorological station, located at the center of the peninsula, and the New-Carlisle's station, located in the south of the peninsula, record a mean annual temperature of 1.7°C and 3.7°C with totals precipitations of 1117mm and 1096mm among which 48% and 23% of which falls as snow, respectively (Environment Canada, 2017).

Instrumental records indicate that temperatures and precipitation regime have remained stable across the Gaspé Peninsula over the 20th century. While significant positive trends in minimum, mean and maximum temperatures occurred in the southern and western parts of the province of Québec between 1960 and 2005, these trends are non-significant for the study area (Yagouti *et al.*, 2008). Similarly, few instrumental records display significant trends for the precipitation regime. We performed a similar analysis specifically for the study area where we reconstructed the changes of annual minimum, mean and maximum temperatures for the 1892-2015 period, by averaging all available records into ten groups of close meteorological stations (Fig. 2-2). The trends observed are

mostly near zero and non-significant (nonparametric Mann-Kendall trend test,  $\alpha = 0.05$ ). Some of the significant trends measured are positive (temperature increase) while some are negative and no clear warming trends emerge for the last 100 years. Detailed results of this analysis are shown in appendix S2-1 for mean monthly temperature trends and in appendix S2-2 for total monthly precipitation.

In contrast, extensive anthropogenic disturbances have occurred, mostly over the last 100 years. The first European arrived during the 17th century and settled exclusively in the outer fringe of the peninsula. The first hiterland intrusions occurred in the 19th century, including scientific exploration, land surveys and selective logging along watercourses. Forest clearance for agriculture in the 19th and early 20th century was concentrated in the peripheral temperate ecozone, but settlement fires escaped toward the center of the peninsula (BAEQ, 1966; Le Groupe Dryade, 1986). Industrial logging began around 1900 along most rivers, which were used for timber floating. Logging operation became extensive after the 1940s, with the development of a road network and truck transports. Before European settlement, Native Americans (the Algonquian Mi'kmaq) occupied mostly the outer fringe of the peninsula, with infrequent intrusion into the center of the region (Blanchard, 1930; Desjardins *et al.*, 1999). These Native Americans were nomads and are not particularly known using fires for forest clearance or hunting, thus probably ignited only few forest fires.

### Databases

We used early land survey records to reconstruct the presettlement forest composition. In the 19th and 20th centuries, surveyors divided the land before settlement, describing the topography, hydrography, soils and forest composition along township lines. In total, this study is based on survey records made into 94 different townships (townships are generally 10 × 10miles). In order to describe the forest prior significant anthropogenic disturbances, we restricted our analysis to survey records produced before 1900 for the

temperate ecozone and before 1940 for the boreal ecozone, corresponding to the onset of extensive logging in the two ecozones, respectively.

Typically, the surveyors' logbooks contain lists of taxa ranked according to their general importance in the forest cover at a precise location. A validation study conducted in the study region and based on an early forest inventory indicated that surveyors ranked taxa using criteria directly equivalent to the basal area of stems with a diameter greater than three inches (7.62cm) at breast height (Terrail *et al.* 2014). Logbooks also contain mentions of disturbances of the forest cover by some named agents (fire, windthrow, logging or settlement). The observations noted by the surveyors were mostly (62.7%) made along line segments with a clear beginning and ending. The remainder corresponds to points irregularly spaced along the surveyed lines.

Data were georeferenced using ArcGIS 10.0 (ESRI, 2010) and modern cadastral maps (scale 1: 20 000) built from early land surveys. By comparing the location of permanent features (lakes and confined rivers) between the surveyors' logbooks and the modern maps, the spatial uncertainty of georeferenced observation was determined to be 14.1m and 90% of the observation had a georeferencing error of fewer than 10m. Observations with a spatial uncertainty of more than 40m (7.8% of all observations) were discarded from all analysis.

We assessed changes in forest composition between the presettlement and modern periods by comparing survey records with the four decadal forest inventories (1976, 1987, 1998-2005 and 2008) conducted by the Government of Québec. These inventories are intended to estimate the standing wood volume available and are based on 0.04ha sampling plots randomly stratified according to major forest stand type (MFFP, 2015, 2016). Unforested (agriculture, urban, etc.) and unproductive lands (marsh, peatlands, etc.) as well as inaccessible stands (slope > 40%) were excluded from the survey. Within plots, individual stems were tallied according to species and 2cm DBH classes, thus allowing computation of the basal area by species. We grouped species of the *Picea*, *Pinus*, *Populus* and *Acer* genus to the genus level to match the taxa nomenclature used by surveyors. Taxa

were then ranked by decreasing order of basal area to allow comparisons with the ranked taxa list of the surveyors (Dupuis *et al.*, 2011). Only the taxa contributing to the first 95% of the total basal area were considered, in order to obtain similar frequency distributions of taxa numbers in observations for the two time-periods (see chapter 1).

To measure the impact of fire disturbances on composition changes, the 20th century fire history of the region was reconstructed using three databases (Appendix S2-3). First, we georeferenced 12 historical maps (scale 1: 63 000) based on 1927, 1928 and 1938 aerial photos, collectively covering the entire study area. The 1927 and 1928 photos were vertical while the 1938's were oblique. The polygons indicated as "burned" were digitized using ArcGIS 10.0 (ESRI, 2010). Second, we used fire database of the MFFP that contains perimeters the fire events from 1920 to present-day (MFFP 2017). Third, we used fire mentions in the surveyors' logbook to validate and correct the location of fire polygons from historical maps and from the MFFP database.

In order to measure the impact of forest management on compositional changes, we mapped plantation, clear and partial cutting, as well as commercial and pre-commercial thinning polygons (Appendix S2-4), using forest maps from the four provincial decadal forest inventories (MFFP,2015). These maps were built from aerial photos (scale 1: 20 000) taken in 1974-1975, 1986, 1992-1993 and 2004, respectively. Logging operations prior to the 1960s remain unknown.

### Analysis

Taxa prevalence for the presettlement and present-day time-periods was calculated from surveyors' observations and modern plots, respectively. The prevalence of a given taxon corresponds to the total weight of all taxa lists including this taxon relative to the total weight of all taxa lists and is computed using the following formula:

$$P_i = N_i / M$$

where  $P_i$  is the prevalence of the taxon  $i$ ,  $N_i$  is the total weight of all taxa list where the taxon  $i$  is listed and  $M$  is the total weight of all taxa list. Weights of linear and point observations equal their length and mean spacing (*i.e.* mean distance to the preceding and following observations), respectively (Dupuis *et al.*, 2011).

For both time-periods, taxa prevalence was mapped using a grid of 268 cells of  $100\text{km}^2$  ( $10\text{km} \times 10\text{km}$ ) across the study region. In each cell, taxa prevalence was computed, using the corresponding surveyors and modern plots observations. Cells containing less than four observations for a given period were discarded, to assure a minimum representativeness of the cell. Similarly, taxa prevalence was calculated along the elevation gradient by considering 40m elevation classes, which were built from a digital elevation model based on hypsometric curves (scale 1: 20 000; 10m elevation interval). Elevation classes including less than 1.5% of the total number of observations were discarded.

In order to measure the impact of fire and forest management on forest composition, present-day taxa prevalence was calculated separately for plots located in burnt and unburnt sectors as well as for managed and unmanaged sectors. The prevalence was calculated for every tree species, *i.e.* even for the species of the genus previously grouped. This allows a more detailed comprehension of the forest compositional changes. Plots within 500m of the fire limits were excluded from the analyses, because the border of several fire polygons appeared to be unrealistically smooth. Prevalence differences between these disturbed and undisturbed sectors were tested with a chi-squared test ( $\alpha = 0.05$ ). We used linear redundancy analyses (RDA) to visualize the correlation between taxa prevalence, environmental (elevation, slope, soil drainage and ecozone) and disturbance variables (fire, logging and plantation), as well as the co-occurrence of the taxa, for the presettlement and present-day time-periods. This also allows us to quickly identify the most important factors (environment and disturbances) that explain the taxa distribution in the study area.

The fire burn rate (the proportion of burned area per year) and fire cycle (the number of years required for the cumulated surface area of all occurring fires to equal the area

under consideration) was calculated from the surveyors' fire mentions (Lorimer, 1980). This method provides estimations rather than precise values, because we do not precisely know how long surveyors have mentioned fire events after their occurrence (what we call the post fire persistence). We estimated the burn rate and the fire cycle for four time-periods (1820-1859, 1860-1899, 1900-1939 and 1940-1967), considering a post fire persistence of 10, 30 and 50 years (Williams & Baker, 2012). Using these four short time-periods allows us to measure the progressive modification of the fire regime consequent to the human occupation of the study area.

## II.2.4 Results

The presettlement forest was mostly composed of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill) and spruces (*Picea* spp. L.), being present in 83.4% and 78.0% of the observations, respectively (Table 2-1). Paper birch (57.2%) was the third most prevalent species, followed by yellow birch (25.9%) and eastern white cedar (20.5%). Present-day taxa prevalence shows that paper birch, poplars (*Populus* spp. L.) and maples increased, while eastern white cedar, pines and yellow birch decreased. Paper birch and poplars increased but mostly in the burned sectors, while maples increased mostly in the unburned sectors. Of the three poplar species, trembling aspen is the only one showing an increase. Compared to the presettlement maples prevalence, both maple species increased, but red maple (*Acer rubrum* L.) is more prevalent than sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) in the present-day forest. Eastern white cedar and yellow birch decreased in every sector, but mostly in the burnt sectors.

During the presettlement epoch, balsam fir, spruces and paper birch, occurred over the entire elevation range, whereas the remaining taxa attained their altitudinal limit (Fig. 2-3). These altitudinal ranges and limits remained stable over the last century for all taxa, around 560m for eastern white cedar and yellow birch, 520m for maples and 360m for pines. The fact that the presettlement altitudinal limit of the maple taxon exactly correspond to the present-day limit of red maple (Fig. 2-4), whereas the present-day limit of sugar maple is much lower at 440m, suggest that red maple formed the presettlement limit of the maple taxa as it does today. White spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss.) is mostly present in the highest elevation classes while black spruce (*Picea mariana* (Mill.) Brit.) is absent on these, being mostly present in the mid elevation classes. While the poplars presettlement altitudinal limit cannot be determined due to low prevalence of the taxon, trembling aspen, by far the most abundant present-day poplar, reach its limit at 760m.

Balsam fir, spruces and paper birch were the most prevalent taxa across the entire study area during the presettlement period (Fig. 2-5). Balsam fir and paper birch prevalence

increased across the study area and few cells show a decrease. For the spruces, a similar number of cells shows an increase and a decrease in their prevalence. Eastern white cedar and yellow birch prevalence was high (up to more than 90%) in some portion of the study area, generally in the temperate ecozone, while they were often absent in the boreal ecozone. Pines were present in a few specific locations. The prevalence of these three taxa decreased in nearly every cell where they were present. Poplars were nearly absent in the presettlement forest and increased mostly in the temperate ecozone and in the eastern portion of the study area. These poplars are mostly the trembling aspen while the balsam poplar (*Populus balsamifera* L.) is present only in a few cells (Fig. 2-6). Maples were present only in a few cells of the temperate ecozone and increased across this ecozone. This increase is shared between red and sugar maple, although red maple shows the most extended distribution.

The first axis of the RDA ordination graph of the presettlement taxa prevalence shows mostly the elevation gradient whereas the second shows the slope and drainage gradients (Fig. 2-7). Spruces, balsam fir and paper birch are the most positively correlated taxa with the first axis, while yellow birch and eastern white cedar are the most negatively correlated. Paper birch, yellow birch, balsam fir and maples are the most positively correlated taxa to the second axis while eastern white cedar is the most negatively correlated. The R-squared value of this RDA ordination is 0.07.

The first axis of the RDA ordination graph of the modern taxa prevalence also shows mostly the elevation gradient (Fig. 2-8). However, the second axis shows mostly the disturbance history, where the fire vector points towards the negative value and the logging vector pointing towards the positive value, while the drainage gradient is shown in the third axis. Black spruce is the most positively correlated taxa with the first axis, while red maple, yellow birch, eastern white cedar and sugar maple are the most negatively correlated. Balsam fir is the most positively correlated taxa to the second axis while trembling aspen and black spruce are the most negatively correlated. Paper birch is the most positively

correlated taxa to the third axis while eastern white cedar and black spruce are the most negatively correlated. The R-squared value of this RDA ordination is 0.12.

The fire cycle values calculated with the surveyors' fire mentions show an increasing trend of fire activity over time over time (Table 2-2). Estimated burn rates were higher in the temperate than the boreal ecozone, during all time-periods considered.

## II.2.5 Discussion

The presettlement forest composition as well as the postsettlement compositional changes reconstructed here are representative of results from several studies done in the northern temperate or southern boreal biomes of North America. (Oosting & Reed, 1944; Cogbill *et al.*, 2002; Dupuis *et al.*, 2009; Vadeboncoeur *et al.*, 2012; Thompson *et al.*, 2013; Boucher *et al.* 2017). These biomes are often dominated by balsam fir and spruces, often associated with paper birch (for the boreal ecozone) as well as by maples, yellow birch, pines and eastern white cedar (for the temperate ecozone). The 20th century increases in paper birch, trembling aspen and maples as well as the decreases in eastern white cedar, pines and yellow birch have been widely documented and appears to be general features of these biomes (Fortin, 2008; Dupuis *et al.*, 2009; Fei & Steiner, 2009; Nowacki & Abrams, 2015). A slight increase in balsam fir and spruces was also measured in the study area, which was previously reported in a few studies for the balsam fir (Friedman & Reich, 2005; Pinto *et al.*, 2008; Dupuis *et al.*, 2009). The increase in spruces is, however rarely observed (Pinto *et al.*, 2008).

Our findings contribute to clarify the relative contribution of climate change versus disturbances on the compositional changes of forest ecosystems since presettlement times. More specifically, our results show that compositional changes similar to those documented across northern temperate zone may have occurred in the absence of significant climate changes. Other studies suggested that the disturbances and competition of the last century played a more important role than climate change composition changes (Duchesne & Ouimet, 2008; Gimmi *et al.*, 2010; Nowacki & Abrams, 2015; Zhang *et al.*, 2015a) or that despite the changing climate, modern ecotone boundaries remained in the same location (Cogbill *et al.*, 2002).

According to the analyses performed by Yagouti *et al.* (2008), the climate of eastern Québec, including the Gaspé Peninsula, remained stable between 1960 and 2005. Even if this time-period is relatively short, it corresponds to the strongest warming trend of the

twentieth century across the northern hemisphere as well as Québec, especially after 1980 (Anchukaitis *et al.*, 2017; Gennaretti *et al.*, 2017). Precipitations and warming trends measured from the meteorological station groups of the region are near zero or non-significant and of small amplitude. Their analysis considered several aspects of climate change, such as minimum, mean and maximum annual and seasonal temperatures, thaw/frost days, length of growing season, cooling and heating degree days, total rain and snow precipitation and number of raining and snowing days. Moreover, our temporal extension of this analysis to the entire twentieth century suggests that temperatures and precipitations have remained stable over the last 100 years (Fig. 2-1, Appendix S2-1 and S2-2). Although no multicentury temperature reconstruction is available for the Gaspé Peninsula, it is likely that the 20th century has been warmer than the first half of the 19th century (Anchukaitis *et al.*, 2017; Gennaretti *et al.*, 2017). However, the stable altitudinal distributions of the taxa (Fig. 2-3) supports our premise that the climate has remained stable and therefore climate change has played a small role in the composition changes documented.

The increase fire activity seems to be an important phenomenon that structured forest compositional changes during the 20th century. The prevalence changes (increase in paper birch and trembling aspen, at the expense of the eastern white cedar and yellow birch) are significantly correlated to these fires (Table 2-1). The composition changes are also mostly located in specific sectors, like the east of the peninsula (Fig. 2-5), which corresponds to a burned area (Appendix S2-3) Unlike other studies that reported fire suppression following Euro-American settlement (Guyette & Spetich, 2005; Friedman & Reich, 2005; Sands & Abrams, 2011; Hanberry *et al.*, 2012; Nowacki & Abrams, 2015), the Gaspé Peninsula witnessed an increase in fire frequency (Table 2-2). This increase in fire frequency associated with human occupation is a worldwide phenomenon (Bowman *et al.*, 2011) previously documented in adjacent areas (Wein & Moore, 1977, 1979; Blanchet, 2003; Dupuis *et al.*, 2011; Tremblay-Daoust, 2011; Terrail, 2013). Many facts support this interpretation of anthropogenic fires. First, the computation of the causes of fire ignitions in the region during the 20th century indicates that 70% were caused by humans, while 10%

were natural and 20% are unknown (Le Groupe Dryade, 1986). Second, the reduced fire cycle length (Table 2-2) temporally coincides with the period of settlement and logging of the region. Third, the burned areas are mostly located or are connected to the outer fringe of the peninsula or to the Matapedia Valley (west of the study area), where human occupation was concentrated and forest clearance for agriculture took place (Terrail, 2013). Finally, the presettlement forest composition reconstructed is consistent with a long fire cycle regime, with few pyrophile species (trembling aspen, paper birch and pines) and many pyrophobe species (balsam fir, white spruce, eastern white cedar and yellow birch) (Thomas-Van Gundy & Nowacki, 2013).

The composition changes are also associated with the recent logging operations of the region (Table 2-1). Most of the prevalence differences between the managed and non-managed sectors are statistically significant and can be explained by the autecology of the taxa. For example, the long lived and shade tolerant eastern white cedar is mostly found on the non-managed sectors, while the shade intolerant paper birch is found on recently managed sectors. Such patterns had previously been documented (Heitzman *et al.*, 1997; Bergeron, 2000; Larouche, 2006). However, it is important to note that logging operations and 20th century fires are two mostly collinear variables, spatially separated, because the recent logging operations generally took place in mature forest that did not burn for at least 80 years (see Appendix S2-3 and S2-4). Because of this spatial organization of the disturbances, some confounding results are found. For example, trembling aspen is more prevalent on the non-recently managed sectors, despite being shade intolerant, fast growing and having prolific regeneration following clear cutting (Fortin 2008; Laquerre *et al.*, 2011). In the Gaspé Peninsula, trembling aspen is strongly associated with the fire disturbances, which are spatially separated from the logging operations. The trembling aspen prevalence on recently managed sectors is still higher than its presettlement prevalence.

Even with slight prevalence differences between disturbed and undisturbed sectors, some taxa display statistically significant differences, like for the balsam fir, which display

a prevalence of 94.1% in managed sector vs 93.0% in unmanaged sector. To clarify this situation, absolute number of plots where these tree taxa are present or absent, depending on whether the plots is located in a disturbed or undisturbed sector are presented (Appendix 2-S5). We can see that balsam fir is present mostly in the managed sectors (12 535 plots in managed sectors vs 9 254 in unmanaged sectors) and that it is mostly absent on the unmanaged sectors (845 plots in unmanaged sectors vs 536 plots in managed sectors). This observation is even more significant, because more plots are located in managed sectors (13 071 plots in managed sectors vs 10 099 plots in unmanaged sectors)

The altitudinal limit and spatial distribution remained the same for every taxon. However, changes in taxa prevalence in reaction to disturbances occurred, but these changes are observed within the spatial and altitudinal range of the taxa. The most explicit example of this phenomenon is the maples. An important increase in prevalence is observed, but its altitudinal and spatial distribution remain unchanged. Every change in forest composition documented in this study can be explained by the disturbance history and the autecology of the taxa. Eastern white cedar and yellow birch have poor regeneration following fire (Bergeron & Charron, 1994; Heitzman *et al.*, 1997). White and red pines were heavily logged in the 19th and 20th century (Desjardins *et al.*, 1999, Pinna *et al.*, 2009). The increase in paper birch and poplars are generally associated with fire and logging disturbances (Bergeron, 2000; Fortin, 2008). Other recent studies reached similar conclusions (Bouchard & Pothier, 2011, Boucher *et al.*, 2014; Boucher *et al.*, 2017).

Maples species, both red and sugar maple, reach their latitudinal and altitudinal limit in the study area and more generally all along the transition line between the boreal and the temperate ecozones. Consequently, the increase of maples since the presettlement period in such areas has been previously suggested to be a consequence of the warming climate (Abrams, 1998; Tremblay *et al.*, 2002; Goldblum & Rigg, 2005; Fei & Steiner, 2007, 2009; Fisichelli *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015b). According to this interpretation, upward and northern migration of maples distribution is expected (Jump *et al.*, 2009; Beckage *et al.*, 2008; Boisvert-Marsh *et al.*, 2014). However, no clear migration is observed in our study

area. Our results support the interpretation that the increases in the maple species are caused by the recent disturbances. Some authors suggested that the increase in red maple is due to fire suppression (Abrams 1998; Hanberry *et al.*, 2012; Nowacki & Abrams 2015). In the Gaspé Peninsula, maples are negatively correlated to fire, but their increases happened in a context of increasing stand replacing disturbance frequency. The sugar maple is generally considered as long lived, shade tolerant and late succession species (previously called "climax species"), thus disfavored by large scale canopy replacing disturbances (Dansereau, 1944; Grandtner, 1972; Parker *et al.*, 1985). However, sugar maple displays several traits and strategies that allow it to react quickly following disturbances, such as prolific seed production, excellent germination rate on a wide diversity of substrate and fast growth rate when exposed to light (Harlow *et al.*, 1978; Nolet *et al.*, 2008). Consequently, its successional status is being reconsidered and seems more similar to the red maple, a species viewed as opportunistic and fast growing on recently disturbed sites (Nolet *et al.*, 2008; Fei & Steiner, 2009).

The two first axes of the RDA ordination graph of the presettlement taxa prevalence illustrate 7.6% of constrained variance and 46.6% of the unconstrained variance (Fig. 2-7), while three axes for the modern taxa prevalence illustrate 16.2% of constrained variance and 62.7% of the unconstrained variance (Fig. 2-8). The unconstrained variance refers to the variance of the observations illustrated on the PCA axis, while the constrained variance refers to how much variation in the taxa prevalence was correlated to the explanatory variables. The relatively high unconstrained variance (46.6% and 62.7%) and low constrained variance (7.6% and 16.2%) suggests that the Fig. 2-7 and 2-8 illustrates relatively well the variation in taxa prevalence, but poorly the correlation between taxa frequency and the environmental variables. For this reason, the RDA ordination graphs should be interpreted with caution, only in addition the other analysis previously presented.

Many trends documented in this study are observed with the RDA and the ordination graphs should be regarded as a synthesis of these trends. The presettlement and present-day forests are structured by the same environmental variables and in the same way. The tree

taxa and the environmental vectors are positioned in the same region of the multidimensional space, illustrating that the changes in taxa prevalence occurred within the spatial distribution of the taxa. The elevation gradient is the most important explicative variables, followed by the soil drainage, which are two permanent variables. The principal change in the present-day forest is the addition of the fire and logging disturbances. Logging and fires are negatively correlated, because burnt sectors were generally not managed after the fire occurrence, because the forest is too young. Logging operation generally begins, in burned sectors, about 80 years after the fire event.

Our study does not imply that climate change was not be a causal factor of compositional changes in regions where significant warming trends occurred. Indeed, several studies reported recent tree line, ecotone or plant species migration along latitudinal or altitudinal gradient in response to climate change (Walther *et al.*, 2002; Beckage *et al.*, 2008; Boisvert-Marsh *et al.*, 2014). Instead, our results precise the potential effects of disturbances in absence of significant warming trend, by showing that disturbances alone may have been sufficient to trigger forest compositional changes of the same type and magnitude than changes documented across large areas of the northeastern North American temperate zone.

## **II.2.6 Acknowledgements**

We thank Raphaële Terrail, Mariève Bouchard-Marmen, Sarah Desjardins and Myriane Houde-Poirier for their help in the database construction. Heather Boyle helped with the english translation. The study was financially supported by the FRQNT, the Chaire de Recherche sur la Forêt Habitée and the Groupe BOREAS. The MFFP provided some historical fire location.

## II.2.7 References

- Abrams MD (1998) The red maple paradox: What explains the widespread expansion of red maple in eastern forests? *BioScience*, **48**, 355-364.
- Anchukaitis KJ, Wilson R, Briffa KR, Büntgen U, Cook ER, D'Arrigo R, Davi N, Esper J, Frank D, Gunnarson BE. Last millennium Northern Hemisphere summer temperatures from tree rings: Part II, spatially resolved reconstructions. *Quaternary Science Reviews*, **163**: 1-22.
- Beckage B, Osborne B, Gavin DG, Pucko C, Siccama TG, Perkins T (2008) A rapid upward shift of a forest ecotone during 40 years of warming in the Green Mountains of Vermont. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**, 4197-4202.
- Bergeron Y, Charron D (1994) Postfire stand dynamics in a southern boreal forest (Québec): A dendroecological approach. *Écoscience*, **1**, 173-184.
- Bergeron Y (2000) Species and stand dynamics in the mixed woods of Quebec's southern boreal forest. *Ecology*, **81**, 1500-1516.
- Blanchard R (1930) Études canadiennes : I. La presqu'île de Gaspé. *Revue de Géographie Alpine*, **18**, 5-112.
- Blanchet P (2003) Feux de forêt : l'histoire d'une guerre. Trait d'union, Montréal, Québec.
- Boisvert-Marsh L, Périé C, de Blois S (2014) Shifting with climate? Evidence for recent changes in tree species distribution at high latitudes. *Ecosphere*, **5**, 1-33.
- Bouchard M, Pothier D (2011) Long-term influence of fire and harvesting on boreal forest age structure and forest composition in eastern Québec. *Forest Ecology and Management*, **261**, 811-820.

- Boucher Y, Arseneault D, Sirois L (2006) Logging-induced change (1930-2002) of a preindustrial landscape at the northern range limit of northern hardwoods, eastern Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, **36**, 505-517.
- Boucher Y, Grondin P, Auger I (2014) Land use history (1840-2005) and physiography as determinants of southern boreal forests. *Landscape Ecology*, **29**, 437-450.
- Boucher Y, Auger I, Noël J, Grondin P, Arseneault D (2017) Fire is a stronger driver of forest composition than logging in the boreal forest of eastern Canada. *Journal of Vegetation Science* **28**: 57-68.
- Boulanger Y, Gauthier S, Gray DR, Le Goff H, Lefort P, Morissette J (2013) Fire regime zonation under current and future climate over eastern Canada. *Ecological Applications*, **23**, 904-923.
- Boulanger Y, Gauthier S, Burton PJ (2014) A refinement of models projecting future Canadian fire regimes using homogeneous fire regime zones. *Canadian Journal of Forest Research*, **44**, 365-376.
- Bowman DMJS, Balch J, Artaxo P *et al.* (2011) The human dimension of fire regimes on Earth. *Journal of Biogeography*, **38**, 2223-2236.
- Brunet G (2002) Reconstitution historique de la sapinière à bouleau blanc vierge de la Côte-de-Gaspé. Université Laval, Québec.
- Bureau d'Aménagement de l'Est du Québec (BAEQ) (1966) Atlas régional du Bas-St-Laurent, de la Gaspésie et des Îles-de-la-Madeleine, Mont-Joli, Québec.
- Cogbill CV, Burk J, Motzkin G (2002) The forests of presettlement New England, USA: spatial and compositional patterns based on town proprietor surveys. *Journal of Biogeography*, **29**, 1279-1304.
- Dansereau P (1944) Interpenetrating climaxes in Quebec. *Science* **99**, 426-427.

- Desjardins M, Frenette Y, Bélanger J, Héту B (1999) Histoire de la Gaspésie, deuxième édition, Québec, Québec, Institut Québécois de Recherche sur la Culture.
- Duchesne L, Ouimet R (2008) Population dynamics of tree species in southern Quebec, Canada: 1970-2005. *Forest Ecology and Management*, **255**, 3001-3012.
- Dupuis S, Arseneault D, Sirois L (2011) Change from pre-settlement to present-day forest composition reconstructed from early land survey records in eastern Québec, Canada. *Journal of Vegetation Science*, **22**, 564-575.
- Environment Canada (2017) Canadian climate normals or averages 1971-2000. Meteorological service of Canada. Available at: <http://climate.weatheroffice.gc.ca/climate>. Accessed: 2017-01-16.
- Esri (2010) ArcGIS 10. Redlands, California.
- Fei S, Steiner KC (2007) Evidence for increasing red maple abundance in the Eastern United States. *Forest Science*, **53**, 473-477.
- Fei S, Steiner KC (2009). Rapid capture of growing space by red maple. *Canadian Journal of Forest Research*, **39**, 1444-1452.
- Fisichelli NA, Frelich LE, Reich PE (2014) Temperate tree expansion into adjacent boreal forest patches facilitated by warmer temperatures. *Ecography*, **37**, 152-161
- Fortin S (2008) Expansion postcoloniale du tremble (*Populus tremuloides*) dans le bassin de la rivière York, en Gaspésie. Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi.
- Friedman SK, Reich PB (2005) Regional legacies of logging: departure from presettlement forest conditions in northern Minnesota. *Ecological Applications* **15**, 726-744.
- Gennaretti, F, Huard D, Naulier M, Savard M, Bégin C, Arseneault D, Guiot J (2017) Bayesian multiproxy temperature reconstruction with black spruce ring widths and

stable isotopes from the northern Quebec taiga. *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-017-3565-5

Gimmi U, Wohlgemuth T, Rigling A, Hoffmann CW, Bürgi MW (2010) Land-use and climate change effects in forest compositional trajectories in a dry Central-Alpine valley. *Annals of Forest Science*, **67**, 701-709.

Goldblum D, Rigg LS (2007) Age structure and regeneration dynamics of sugar maple at the deciduous/boreal forest ecotone, Ontario, Canada. *Physical Geography*, **23**, 115-129.

Grandtner MM (1972) Aperçu de la végétation du Bas Saint-Laurent, de la Gaspésie et des Îles-de-la-Madeleine. *Cahiers de Géographie de Québec*, **16**, 116-121.

Guyette RP, Spetich MA (2003) Fire history of oak-pine forests in the Lower Boston Mountains, Arkansas, USA. *Forest Ecology and Management*, **180**, 463-474.

Hanberry BB, Palik BJ, He HS (2012) Comparison of historical and current forest surveys for detection of homogenization and mesophication of Minnesota forests. *Landscape Ecology*, **27**, 1495-1512.

Harlow WM, Harrar ES, White FM (1978) Textbook of dendrology, covering the important forest trees of the United States and Canada; 6th edition. McGraw-Hill series in forest resources. Frederick, Maryland.

Heitzman E, Pregitzer KS, Miller RO, Lanasa M, Zuidema M (1999) Establishment and development of northern white-cedar following strip clearcutting. *Forest Ecology and Management*, **123**, 97-104.

Huston MA (1979) A general hypothesis of species diversity. *American Midland Naturalist*, **113**: 81-101.

Iverson LR, Prasad A (1998) Predicting abundance of 80 tree species following climate change in the Eastern United States. *Ecological Monographs*, **68**, 465-485.

- Jump AS, Mátyás C, Peñuelas J (2009) The altitude-for-latitude disparity in the range retractions of woody species. *Trends in Ecology & Evolution*. **24**, 694-701.
- Keane RE, McKenzie D, Falk DA, Smithwick EAH, Miller C, Kellogg LKB (2015) Representing climate, disturbance, and vegetation interactions in landscape models. *Ecological Modelling*, **309-310**, 33-47.
- Krankina ON, Houghton RA, Harmon ME, Hogg EH, Butman D, Yatskov M, Huso M, Treyfeld RF, Razuvaev VN, Spycher G (2005) Effects of climate, disturbance, and species on forest biomass across Russia. *Canadian Journal of Forest Research*, **35**, 2281-2293.
- Laquerre S, Harvey BD, Leduc A (2011) Spatial analysis of response of trembling aspen patches to clearcutting in black spruce-dominated stands. *The Forestry Chronicle*, **87**, 77-85.
- Larouche C (2006) Raréfaction du thuya. Ministère des Ressources Naturelles de la Faune et des Parcs. Gouvernement du Québec. Québec.
- Le Groupe Dryade (1986) Étude de l'importance du rôle écologique du feu dans les parcs nationaux de la région du Québec. Québec, Parcs Canada.
- Lévesque F (1997) Conséquences de la dynamique de la mosaïque forestière sur l'intégrité écologique du Parc National Forillon. Université Laval, Québec.
- Lorimer CG (1980) The use of land survey records in estimating presettlement fire frequency. *Proceedings of the Fire History Workshop*, October 20-24, 1980, Tucson, Arizona. General technical report RM.
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) (2015) Norme de stratification écoforestière, quatrième inventaire écoforestier du Québec méridional. Direction des inventaires forestiers, Gouvernement du Québec, Québec.

- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) (2016) Placettes-échantillons temporaires. Normes techniques. Québec, Gouvernement du Québec.
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) (2017) Base de données sur les feux de forêt (1940 à 2007). Québec, Gouvernement du Québec.
- Nolet P, Delagrangé S, Bouffard D, Doyon F, Forget E (2008) The successional status of sugar maple (*Acer saccharum*), revisited. *Annals of Forest Science*, **65**, 208-217.
- Nowacki GJ, Abrams MD (2015) Is climate an important driver of post-European vegetation change in the Eastern United States? *Global Change Biology*, **21**, 314-334.
- Oosting HJ, Reed JF (1944) Ecological composition of pulpwood forests in northwestern Maine. *American Midland Naturalist*, **31**, 182-210.
- Parker GR, Leopold DJ, Eichenberger JK (1985) Tree dynamics in an old-growth, deciduous forest. *Forest Ecology and Management*, **11**, 31-57.
- Petraitis PS, Latham RE, Niesenbaum RA (1989) The maintenance of species diversity by disturbance. *The Quarterly Review of Biology*, **64**: 393-418.
- Pinna S, Malenfant A, Hébert B, Côté M (2009) Portrait forestier historique de la Gaspésie. Gaspé, Québec, Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles.
- Plieninger T, Draux H, Fagerholm N, Bieling C, Bürgi M, Kizos T, Kuemmerle T, Primdahl J, Verburg PH (2016) The driving forces of landscape change in Europe: A systematic review of the evidence. *Land Use Policy*, **57**, 204-214.
- Robitaille A, Saucier JP (1998) Paysage régionaux du Québec méridional, Direction de la gestion des stocks forestiers et Direction des relations publiques, Ministère des Ressources Naturelles du Québec. Publication du Québec, Québec.
- Rowe JS (1972) Forest regions of Canada, Ottawa, Information Canada.

- Sands BA, Abrams MD (2011) A 183-year history of fire and recent fire suppression impacts in select pine and oak forest stands of the Menominee Indian reservation, Wisconsin. *American Midland Naturalist*, **166**, 325-338.
- Strahan RT, Sánchez Meador AJ, Huffman DW, Laughlin DC (2016) Shifts in community-level traits and functional diversity in a mixed conifer forest: a legacy of land-use change. *Journal of Applied Ecology*, **53**, 1755-1765.
- Terrail R (2013) Influence de la colonisation sur les transformations du paysage forestier depuis l'époque préindustrielle dans l'Est du Québec (Canada). Université du Québec à Rimouski, Rimouski.
- Thomas-Van Gundy MA, Nowacki GJ (2013) The use of witness trees as pyro-indicators for mapping past fire conditions. *Forest Ecology and Management*, **304**, 333-444.
- Thompson JR, Carpenter DN, Cogbill CV, Foster DR (2013) Four centuries of change in northeastern United States forests. *PLoS One*, **8**, e72540.
- Tremblay MF, Bergeron Y, Lalonde D, Mauffette Y (2002) The potential effects of sexual reproduction and seedling recruitment on the maintenance of red maple (*Acer rubrum* L.) populations at the northern limit of the species range. *Journal of Biogeography*, **29**, 365-373.
- Tremblay-Daoust A (2011) Dynamique du chêne rouge à sa limite nordique de distribution naturelle au Parc National Forillon, Gaspésie (Québec). Université du Québec à Rimouski, Rimouski.
- Turner M (2010) Disturbance and landscape dynamics in a changing world. *Ecology*, **91**, 2833-2849.
- Vadeboncoeur MA, Hamburg SP, Cogbill CV, Sugimura WY (2012) A comparison of presettlement and modern forest composition along an elevation gradient in central New Hampshire. *Canadian Journal of Forest Research*, **42**, 190-202.

- Vayreda J, Martinez-Vilalta J, Gracia M, Canadell JG, Retana J (2016) Anthropogenic-driven rapid shifts in tree distribution lead to increased dominance of broadleaf species. *Global Change Biology*, **22**, 3984-3995.
- Walther GR, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJC, Fromentin JM, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature*, **416**: 389-395
- Wang WJ, Hong HS, Thompson III FR, Fraser JS, Hanberry BB, DiJak WD (2015) Importance of succession, harvest, and climate change in determining future composition in U.S. Central Hardwood Forests. *Ecosphere*, **6**: 1-18
- Wein RW, Moore JM (1977) Fire history and rotations in the New Brunswick Acadian Forest. *Canadian Journal of Forest Research*, **7**, 285-294.
- Wein RW, Moore JM (1979) Fire history and recent fire rotation periods in the Nova Scotia Acadian Forest. *Canadian Journal of Forest Research*, **9**, 166-178.
- Williams MA, Baker WL (2012) Comparison of the higher-severity fire regime in historical (A.D. 1800s) and modern (A.D. 1984-2009) montane forests across 624,156 ha of the Colorado Front Range. *Ecosystems*, **15**, 832-847.
- Yagouti A, Boulet G, Vincent L, Vescovi L (2006) Homogénéisation des séries de températures et analyse de la variabilité spatio-temporelle de ces séries au Québec méridional, rapport no. 4. Ouranos, Montréal, Québec.
- Yagouti A, Boulet G, Vincent L, Vescovi L, Mekis E (2008) Observed changes in daily temperature and precipitation indices for southern Québec, 1960-2005. *Atmosphere-Ocean*, **46**, 243-256.
- Zhang J, Huang S, He F (2015a) Half-century evidence from western Canada shows forest dynamics are primarily driven by competition followed by climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **112**, 4009-4014.

Zhang Y, Bergeron Y, Zhao XH, Drobyshev I (2015b) Stand history is more important than climate in controlling red maple (*Acer rubrum* L.) growth at its northern distribution limit in western Quebec, Canada. *Journal of Plant Ecology*, **8**, 368-379.

## II.2.8 Tables

**Table 2-1.** Taxa prevalence (% of all observations) for the presettlement and modern time-periods in disturbed and undisturbed sectors.

	Presettlement forest	Present-day forest			
		Burned	Non- burned	Managed	Unmanaged
Balsam fir	83.4	80.5*	96.1*	94.1*	93.0*
Spruces	78.0	90.5*	81.4*	76.4*	86.1*
White spruce	-	65.5*	68.7*	65.8*	69.4*
Black spruce	-	60.7*	31.4*	27.3*	42.1*
Red spruce	-	14.0*	7.9*	6.7*	9.9*
Norway spruce	-	0.6	0.3	1.0*	0.0*
Eastern white cedar	20.5	7.2*	12.4*	12.1	13.1
Pines	6.2	1.2*	0.8*	1.2*	0.8*
White pine	-	0.5	0.6	0.6	0.7
Red pine	-	0.2*	0.0*	0.1	0.1
Jack pine	-	0.5*	0.2*	0.6*	0.1*
American larch	0.5	1.1	1.5	1.5	1.4
Paper birch	57.2	81.4*	70.9*	73.7	72.4
Yellow birch	25.9	5.7*	18.1*	18.2*	14.7*
Poplars	3.7	61.9*	11.0*	17.8*	23.3*
Trembling aspen	-	61.2*	9.8*	16.2*	22.3*
Balsam poplar	-	2.2	2.1	2.7*	1.9*
large-tooth poplar	-	0.7*	0.1*	0.2	0.1
Maples	6.8	13.7*	19.9*	20.9*	18.9*
Red maple	-	12.9*	15.6*	16.5	15.5
Sugar maple	-	2.0*	7.4*	7.2*	6.1*

-: Unknown prevalence, because the surveyors didn't differentiate the species of these genus

\*: Statistically significant difference between the disturbed and non-disturbed sectors ( $p < 0.05$ ; chi-squared test)

**Table 2-2.** Fire burn rate (as % of burned area per year) and fire cycle estimates (in years) according to time-period and persistence of fire events in historic records. The persistence of a fire event is the presumed duration of the time-period during which surveyors recorded the occurrence of the most recent fire prior to survey.

		Temperate ecozone			Boreal ecozone		
		Post fire persistence (years)					
		50	30	10	50	30	10
1820-1859	Burn rate (%)	0.05	0.08	0.24	-	-	-
	Fire cycle (years)	2046	1228	409	-	-	-
1860-1899	Burn rate (%)	0.10	0.17	0.50	0.05	0.08	0.24
	Fire cycle (years)	995	597	199	2121	1273	424
1901-1939	Burn rate (%)	0.22	0.37	1.11	0.16	0.27	0.82
	Fire cycle (years)	451	271	90	609	365	122
1940-1967	Burn rate (%)	0.69	0.15	3.45	0.22	0.37	1.11
	Fire cycle (years)	145	87	29	452	271	90

-: The fire cycle and burn rate value could not be calculated in the boreal ecozone for the first time-period because the region was not surveyed until the 1860s

## II.2.9 Figures

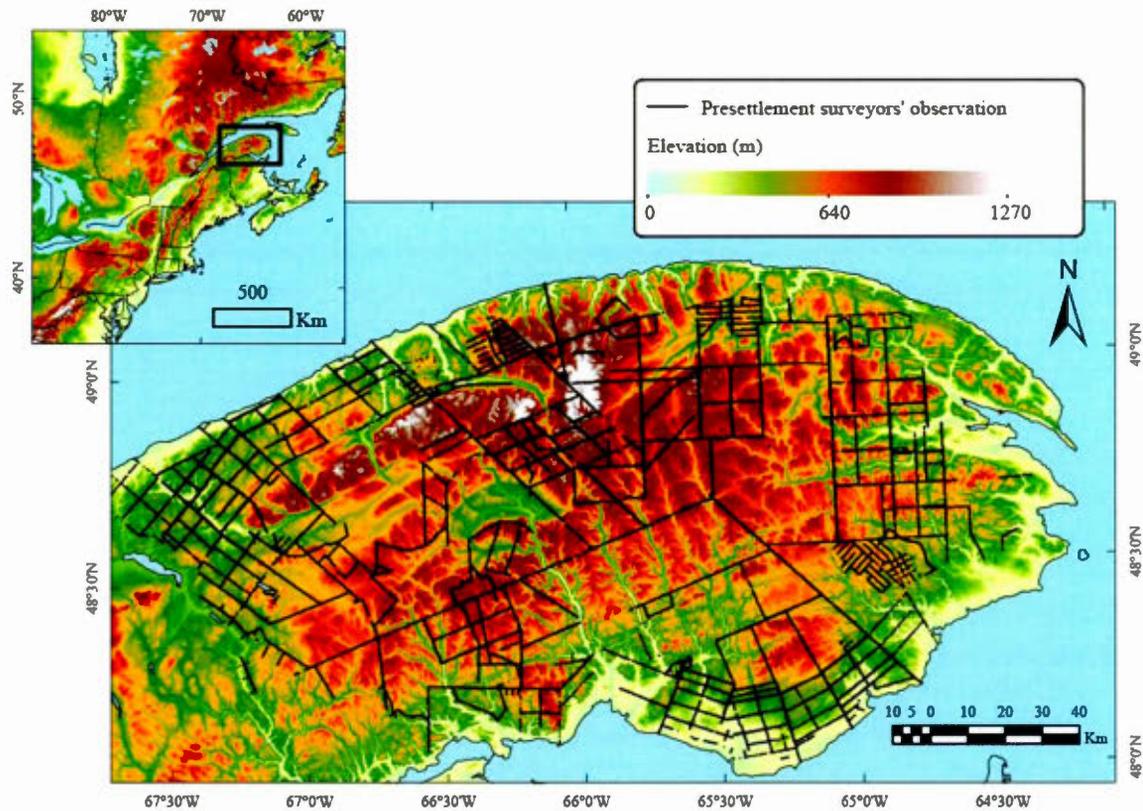
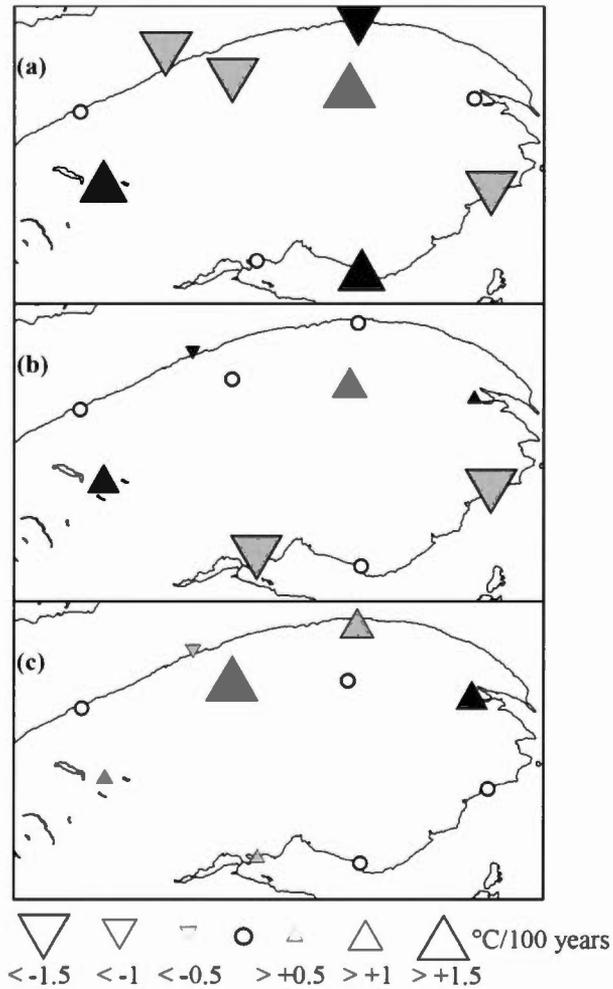
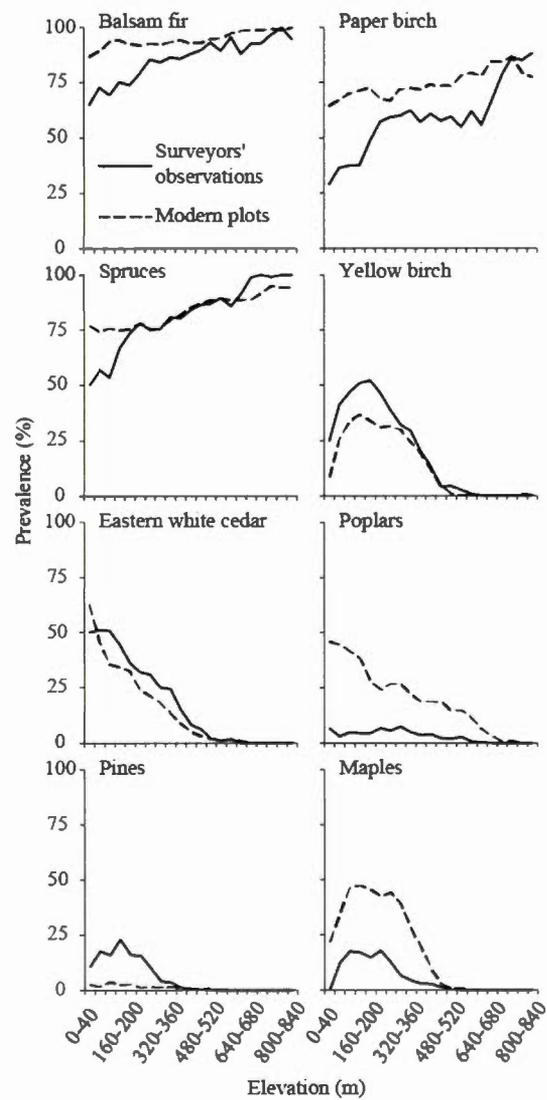


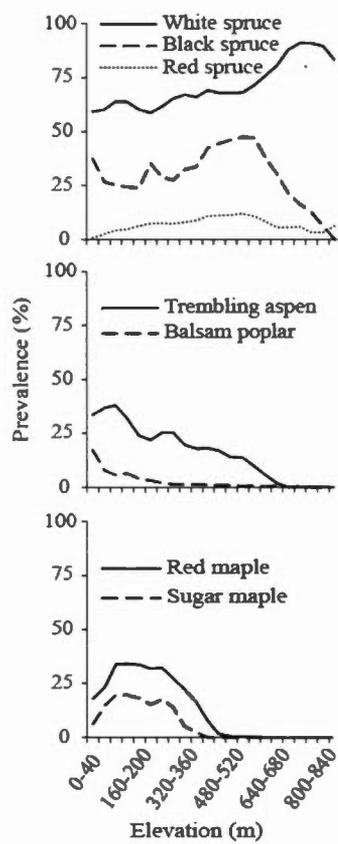
Fig. 2-1. Location of the study area in eastern North America and location of the surveyors' observation.



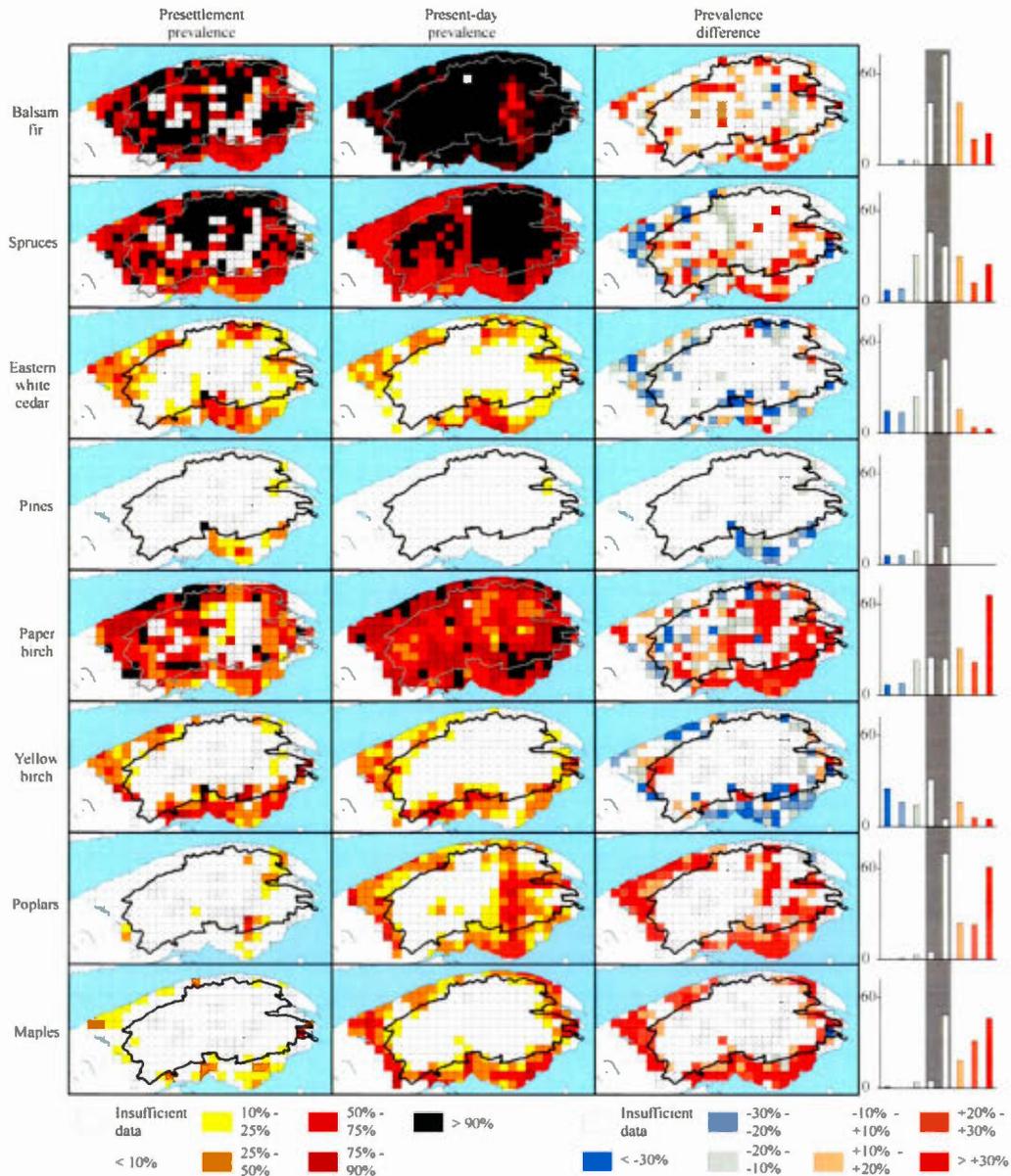
**Fig. 2-2.** Trends in annual minimum temperature (a), mean temperature (b) and maximum temperature (c) over the last 100 years for 10 groups of meteorological station across the study area. Triangles pointing up indicate positive trend while those pointing down indicate negative trend. Black triangles indicate a statistically significant trend (nonparametric Mann-Kendall trend test,  $\alpha = 0.05$ ) while gray ones indicate a non-significant trend. The size of the triangles is proportional to the magnitude of the trend. Circles indicate trend near zero.



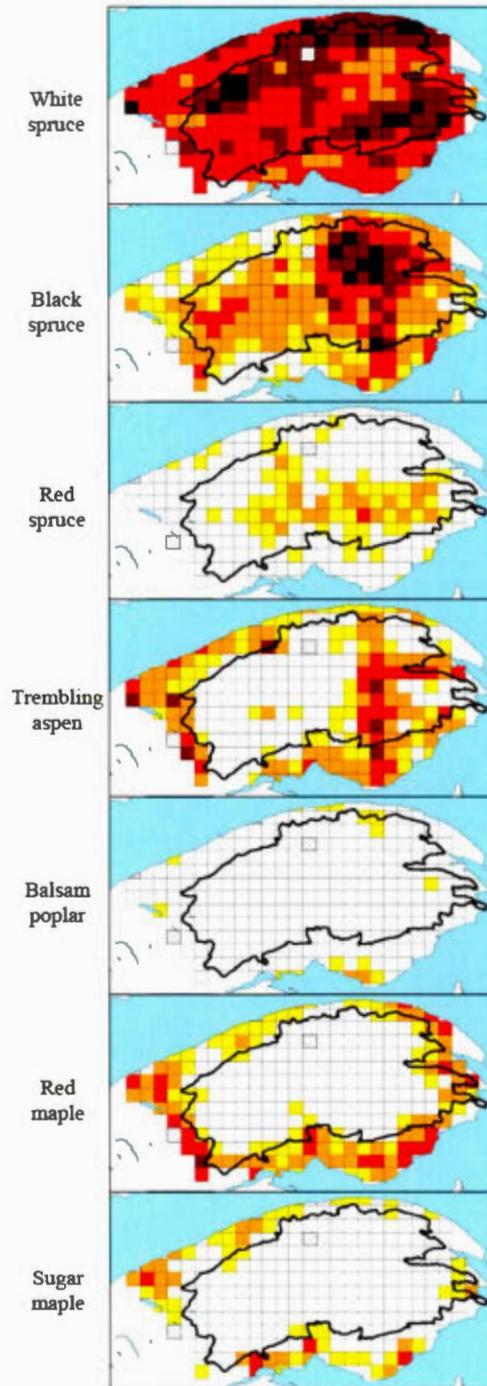
**Fig. 2-3.** Taxa prevalence by elevation classes for the presettlement and present-day time-periods.



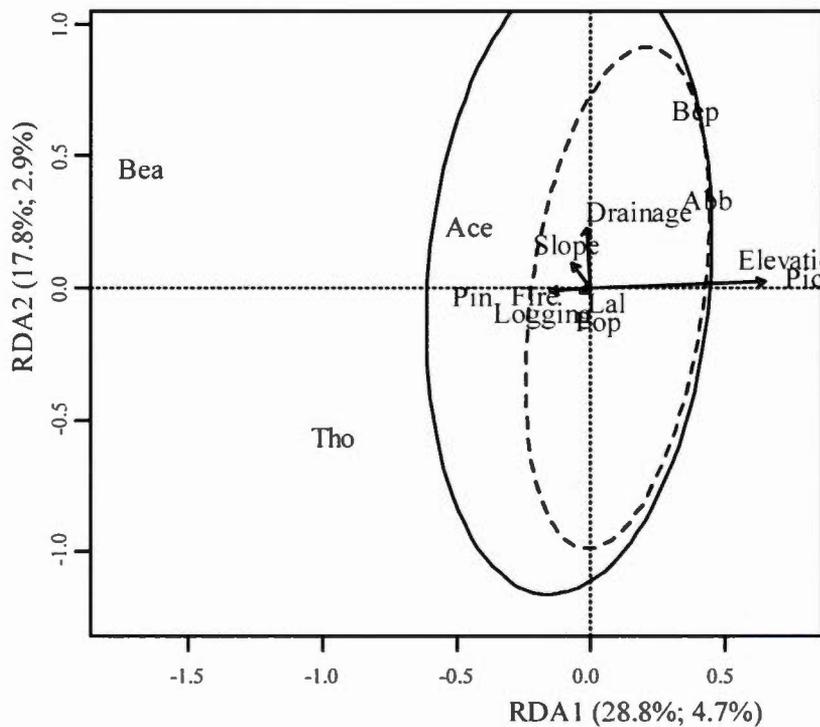
**Fig. 2-4.** Modern species prevalence by elevation classes for species grouped into the spruces, poplars and maples taxa.



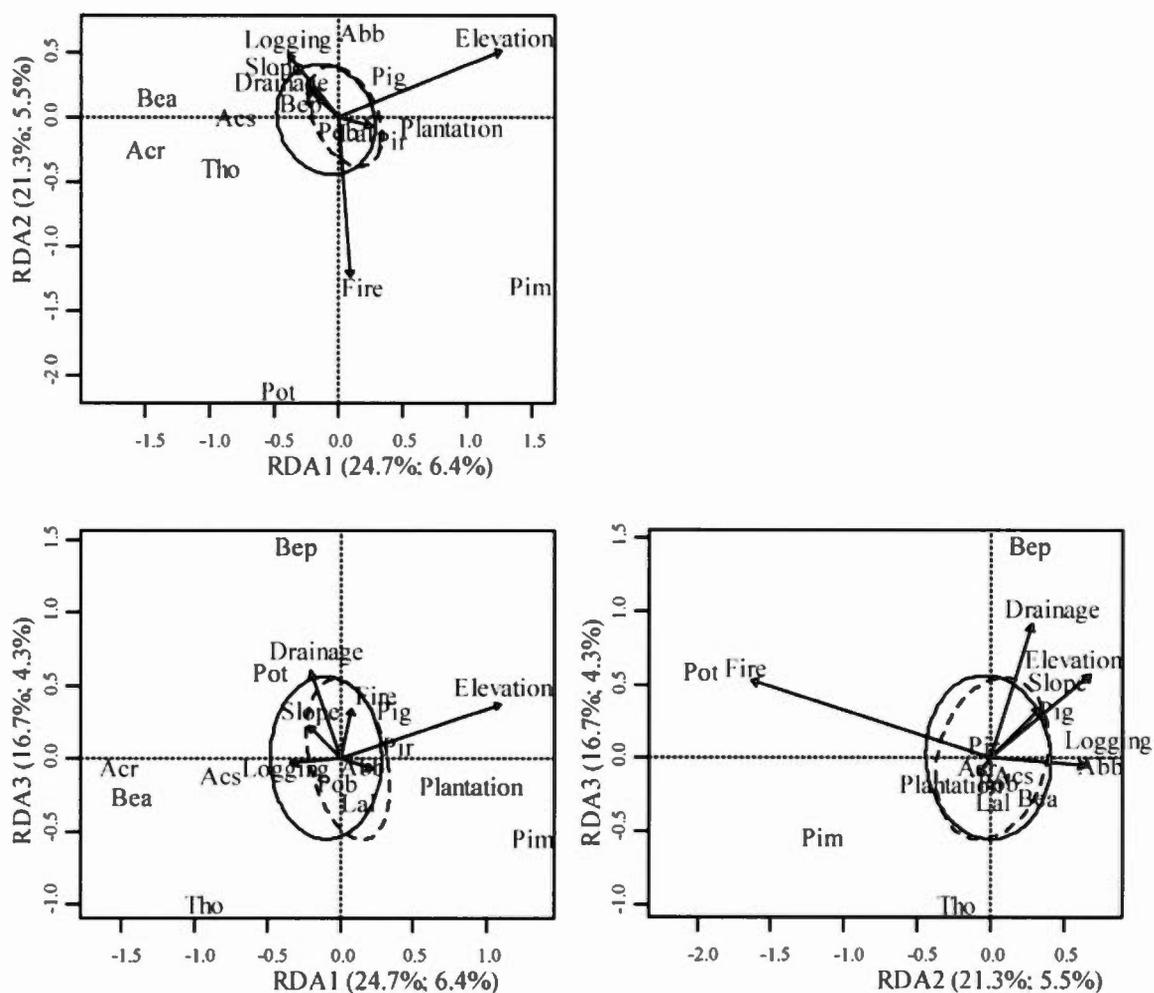
**Fig. 2-5.** Tree taxa prevalence across the study region for the presettlement and present-day time-periods, using a grid of  $10\text{km} \times 10\text{km}$  cells. The prevalence difference is computed from the present-day minus the presettlement values such that positive values (in red) indicate an increase while negative values (in blue) refer to a decrease as compared to presettlement times. The bar diagrams to the right indicate the number of cells within each class of prevalence change and the vertical gray bar indicates differences of less than 10%. The bold line separates the temperate and boreal ecozones.



**Fig. 2-6.** Present-day prevalence across the study region for species grouped into the spruces, poplars and maples taxa. The color legend is the same as in the Fig. 2-5.

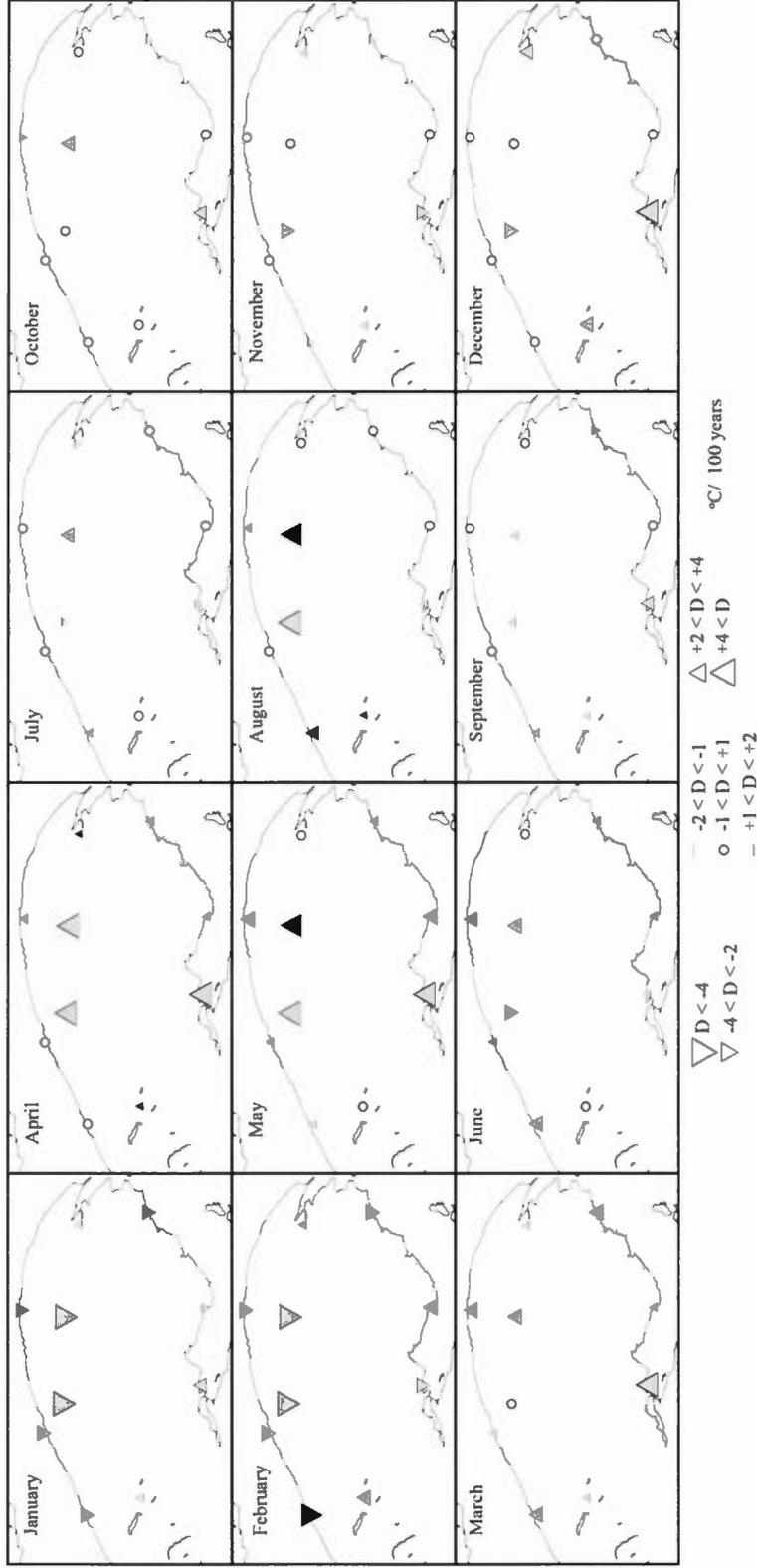


**Fig. 2-7.** RDA ordination graph for the presettlement taxa prevalence correlated to the environmental and disturbance variables. The solid and dashed ellipses enclose 95% of all observations for the temperate and boreal ecozone, respectively. Abb: *Abies balsamea*; Pic: *Picea* spp.; Tho: *Thuja occidentalis*; Pin: *Pinus* spp.; Lal: *Larix laricina*; Bep: *Betula papyrifera*; Bea: *Betula alleghaniensis*; Pop: *Populus* spp.; Ace: *Acer* spp. The numbers in parenthesis indicate the proportion of unconstrained and constrained explained by the axis, respectively.

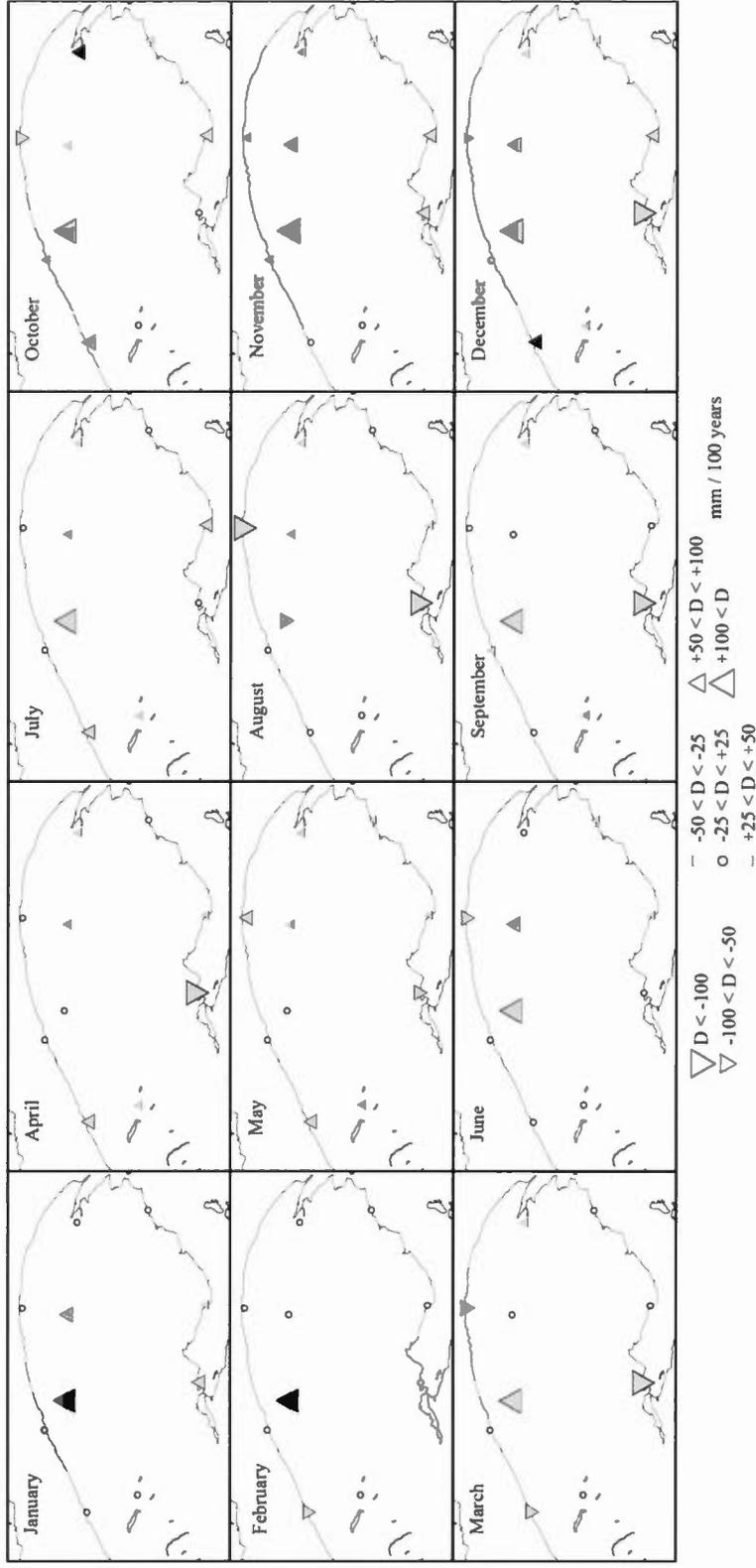


**Fig. 2-8.** RDA ordination of present-day taxa prevalence correlated to the environmental and disturbance variables, using A) the first and second ordination axis, B) the first and third ordination axis and C) the second and third ordination axis. The solid and dashed ellipses enclose 95% of all observations for the temperate and boreal ecozone, respectively. Abb: *Abies balsamea*; Pig: *Picea glauca*; Pim: *Picea mariana*; Pir: *Picea rubens*; Tho: *Thuja occidentalis*; Lal: *Larix laricina*; Bep: *Betula papyrifera*; Bea: *Betula alleghaniensis*; Pob: *Populus balsamifera*; Pot: *Populus tremuloides*; Acr: *Acer rubrum*; Acs: *Acer saccharum*. The numbers in parenthesis indicate the proportion of unconstrained and constrained explained by the axis, respectively.

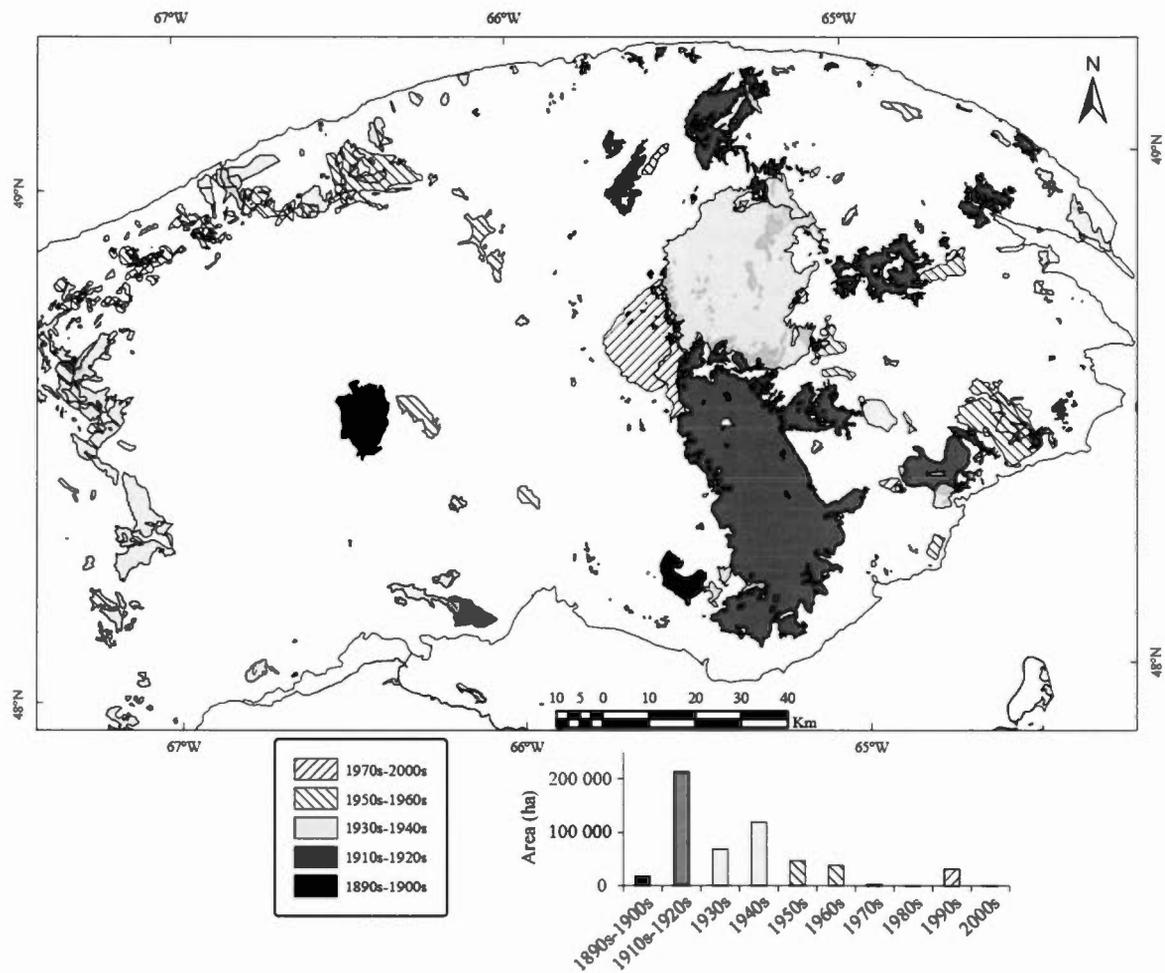
II.2.10 Appendix



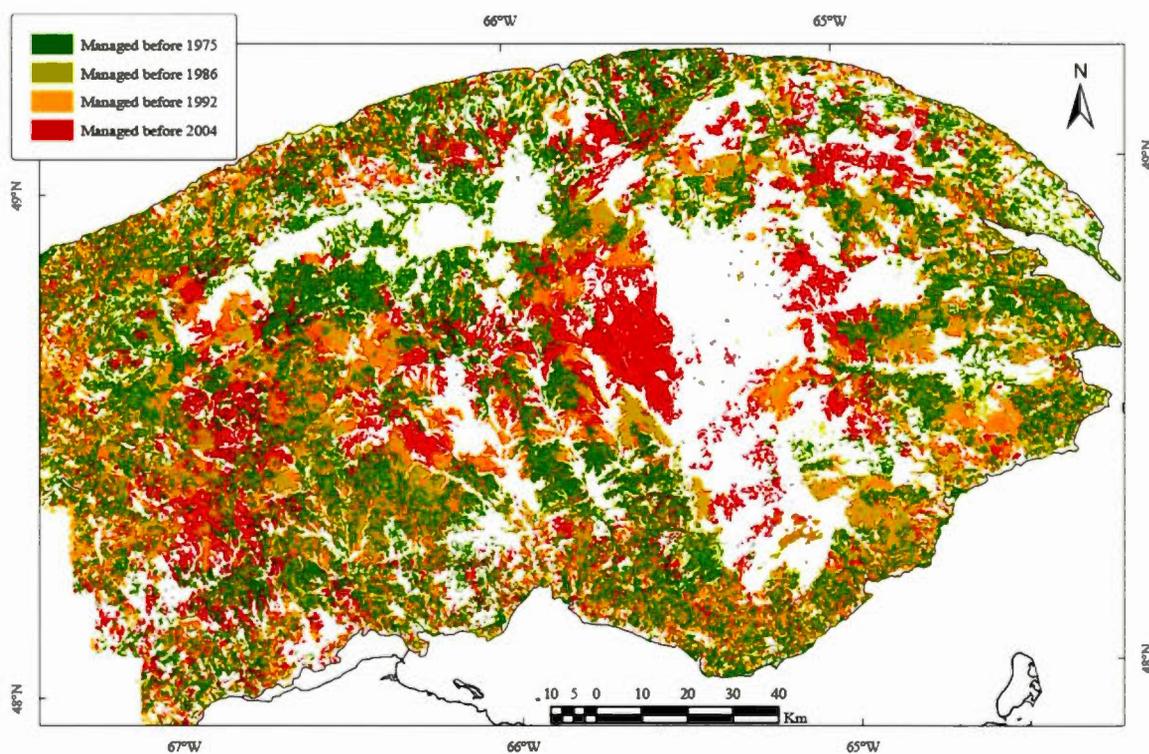
**Fig. 2-S1.** Trends in monthly mean temperature over the last 100 years for 10 groups of meteorological station across the study area. Triangles pointing up indicate positive trend while those pointing down indicate negative trend. Black triangles refer to a statistically significant trend (nonparametric Mann-Kendall trend test,  $\alpha = 0.05$ ) while gray ones refer to a non-significant trend. Triangles size are proportional to the magnitude of the corresponding trend. Circles indicate trend near zero.



**Fig. 2-S2.** Trends in monthly total precipitation over the last 100 years for 10 groups of meteorological station across the study area. Triangles pointing up indicate a positive trend while those pointing down indicate a negative trend. Black triangles refer to a statistically significant trend (nonparametric Mann-Kendall trend test,  $\alpha = 0.05$ ) while gray ones refer to a non-significant trend. Triangles' sizes are proportional to the magnitude of the corresponding trend. Circles indicate trend near zero.



**Fig. 2-S3.** 20th century fire polygons, reconstructed from historical maps (1927-1928 and 1938), MFFP (2017) data as well as from the fire mentions in the surveyors' logbook.



**Fig. 2-S4.** Recent (1960s-2004) forest management activities, including clear and partial cutting, commercial and pre-commercial thinning and plantation, according to forest maps of the four forest inventories conducted by the Government of Québec (MFFP 2015).

**Table 2-S5.** Detailed number of modern plots where some tree taxa are present or absent, depending on whether the plots is located in a disturbed or undisturbed sector

		Burned	Unburned	Managed	Unmanaged	Total
Abb	Present	2 616	19 173	12 535	9 254	21 789
	Absent	632	749	536	845	1 381
Pig	Present	2 131	13 707	8 930	6 908	15 838
	Absent	1 117	6 215	4 141	3 191	7 332
Tho	Present	234	2 478	1 720	992	2 712
	Absent	3 014	14 444	11 351	9 107	20 458
Ac	Present	446	3 979	2 832	1 593	4 425
	Absent	2 802	15 943	10 239	8 506	18 745
Acr	Present	421	3 108	2 213	1 316	3 529
	Absent	2 827	16 814	10 858	8 783	19 641
Acs	Present	64	1 471	1 033	502	1 535
	Absent	3 184	18 451	12 038	9 597	21 635
Total		3 248	19 922	13 071	10 099	

Abb: *Abies balsamea*; Pig: *Picea glauca*; Tho: *Thuja occidentalis*; Ac: *Acer* spp.;  
Acr: *Acer rubrum*; Acs: *Acer saccharum*

**CHAPITRE III**  
**ANALYSE À HAUTE RÉOLUTION TEMPORELLE DES CHANGEMENTS**  
**DE COMPOSITION FORESTIÈRES DANS LE SUD DE LA PÉNINSULE**  
**GASPÉSIENNE (1830-2010)**

**III.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU TROISIÈME ARTICLE**

Ce troisième article, intitulé « Analyse à haute résolution spatiale de changements de composition forestière dans le sud de la péninsule gaspésienne (1830-2010) » a été rédigé par moi-même et par le professeur Dominique Arseneault. Il est écrit en langue française et n'est pas formaté encore pour une revue scientifique particulière. Pour fin de publication, ce chapitre devra être traduit en anglais et formaté.

Plusieurs changements de composition forestière depuis l'époque préindustrielle ont été documentés dans la forêt tempérée de l'Amérique du Nord. Ces changements incluent l'augmentation des feuillus intolérants et opportunistes (peuplier faux-tremble, bouleau à papier, érables) au détriment des espèces tolérantes et longévives (thuya occidental, pruche du Canada, pins, hêtre à grande feuille, bouleau jaune). Toutefois, les causes de ces changements demeurent mal comprises et la chronologie de ces transformations demeure peu documentée. Généralement, les études rétrospectives des changements de composition forestières ont comparé les compositions mesurées à deux époques différentes. Dans cette étude, nous avons utilisé sept jeux de données géoréférencés décrivant la composition forestière à différentes époques pour une même région située dans la péninsule gaspésienne (est du Québec), permettant ainsi de reconstituer la chronologie des changements de composition dans une aire d'étude de 1400 km<sup>2</sup> au cours des derniers 180 ans. Les trois

premiers jeux de données proviennent d'archives d'arpentage primitif (1830-1869, 1880-1899, 1900-1962) tandis que les quatre derniers proviennent des placettes échantillons des quatre programmes d'inventaires forestiers décennaux du gouvernement du Québec (1976, 1987, 1998-2005, 2008). Les résultats permettent de préciser les tendances temporelles des changements de fréquence d'occurrence des taxons arborescents dans la région. Le sapin baumier, les épinettes et le bouleau à papier ont augmenté progressivement en fréquence et en dominance au cours des derniers 180 ans. Les peupliers ont augmenté subitement suite aux incendies du XX<sup>e</sup> siècle. Les pins ont diminué rapidement à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle en réponse aux premières coupes forestières qui ciblaient les plus gros arbres et ne montrent pas de signe de rétablissement. Le bouleau jaune a diminué subitement dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle pour se stabiliser ensuite. Le thuya occidental montre une résilience aux perturbations dans la région. La forêt moderne a été fortement structurée par quelques grands incendies du XX<sup>e</sup> siècle.

Mot clés : écologie historique; écologie forestière; forêt préindustrielle; changement de composition; comparaison de jeux de données

## **ANALYSE À HAUTE RÉOLUTION TEMPORELLE DES CHANGEMENTS DE COMPOSITION FORESTIÈRE DANS LE SUD DE LA PÉNINSULE GASPÉSIENNE (1830-2010)**

### **III.1.1 Introduction**

Plusieurs études ont reconstitué la composition forestière préindustrielle et sa transformation en réponse aux perturbations naturelles et anthropiques depuis la colonisation européenne de l'Amérique du Nord (Whitney 1994, Weir et Johnson 1998, Lorimer 2001, Cogbill *et al.* 2002, Foster et Aber 2004, Thompson *et al.* 2013 Nowacki et Abrams 2015, Danneyrolles *et al.* 2016a, b). Ces études ont permis de décrire la forêt préindustrielle et l'influence de variables environnementales sur cette végétation (*e.g.* altitude, drainage, sols) ainsi que de mesurer les écarts avec la forêt moderne et les causes de changements. Au Québec, ces études ont aussi servi à fixer des cibles d'aménagement écosystémiques (Gauthier *et al.* 2008, Pinna *et al.* 2009b, Rompré *et al.* 2010, Boucher *et al.* 2011).

La plupart reconstitutions de composition forestière préindustrielle n'utilisent qu'une seule époque préindustrielle qui est comparée à une référence moderne; ainsi pour un attribut donné, une valeur décrivant la forêt préindustrielle est comparée à une valeur décrivant la forêt moderne. Par exemple, Boucher *et al.* (2009) ont utilisé des cartes forestières de 1930 pour mesurer l'abondance des peuplements feuillus, mélangés et résineux, qu'ils ont comparé à l'abondance moderne de ces couverts forestiers. Dupuis *et al.* (2011) ont utilisé des observations issues d'archives d'arpentage pour décrire la composition forestière préindustrielle pour l'ensemble du XIX<sup>e</sup> siècle et ont comparé la fréquence préindustrielle des taxons arborescents à la fréquence de ces mêmes taxons dans des placettes échantillons modernes des derniers 40 ans.

Les écosystèmes forestiers sont des systèmes complexes et dynamiques (Oliver et Larson 1996, Frelich 2008). La composition et la structure de ces systèmes ne sont pas statiques et varient continuellement dans le temps, en réponse à des événements

stochastiques (*e.g.* perturbations) ou directionnels (*e.g.* changements climatiques, succession autogène). Pour résoudre le problème de description statique d'un système dynamique, certains auteurs recommandent l'utilisation d'une gamme de variabilité naturelle (*historical range of variability* ou HRV) comme état de référence, permettant de considérer la variabilité potentielle des états des écosystèmes (Morgan *et al.* 1994, Keane *et al.* 2009). La comparaison de la forêt moderne à une seule époque de forêt préindustrielle, même si elle permet de documenter l'ampleur des changements de composition, ne procure qu'un point de référence au sein d'une amplitude de variation qui peut être considérable. De plus, cela ne permet pas de détailler la chronologie des changements pouvant ainsi compliquer l'identification des processus sous-jacents.

Une des méthodes les plus employées pour reconstituer la composition forestière préindustrielle est l'utilisation des observations de composition forestières contenues dans les archives de l'arpentage primitif (Whitney 1994, Dupuis *et al.* 2011, Terrail *et al.* 2014). Ces données ont généralement le désavantage qu'elles décrivent un territoire donné une seule fois. Cependant, dans certains cas, une région peut avoir été arpentée à plus d'une reprise, offrant ainsi des descriptions de la composition forestière en différentes époques. Les équipes dirigées par les arpenteurs cartographiaient le territoire et dressaient les lignes de division en dégagant la végétation sur une largeur d'environ six pieds (1,83 m) (Martel et Tanguay 1982, Boudreau et Gaudreau 2007). Avec le temps, ces lignes de division pouvaient disparaître, en raison de perturbations ou de régénération trop abondante dans les lignes dégagées. Le « réarpentage » (arpentage d'une ligne précédemment arpentée) était alors pratiqué, afin de retracer les lignes.

Une telle situation est retrouvée dans le sud de la péninsule gaspésienne, arpentée à trois reprises entre 1830 et 1870, entre 1880 et 1899 puis entre 1900 et 1962. En y ajoutant les quatre inventaires forestiers modernes réalisés par le gouvernement du Québec (MFFP 2016a), la forêt de la région a été décrite sept fois en 180 ans.

La composition forestière préindustrielle et sa transformation ont déjà été reconstituées dans la péninsule gaspésienne, incluant la région d'étude (Pinna *et al.* 2009a,

Chapitre 2). Les changements principaux changements de composition de la région sont les mêmes que ceux retrouvés dans le reste de l'écozone tempérée de l'est de l'Amérique du Nord, soit une augmentation du bouleau à papier, du peuplier faux-tremble et des érables au détriment du thuya occidental, des pins et du bouleau jaune. De plus, dans la région, le climat est demeuré stable au XX<sup>e</sup> siècle tandis que les perturbations anthropiques ont été fréquentes, supportant l'interprétation que les perturbations sont, régionalement, la principale cause des changements de composition.

L'objectif de cette étude est d'utiliser les multiples jeux de données décrivant le sud de la péninsule gaspésienne en plusieurs époques pour : 1- documenter la chronologie des changements de composition forestière des taxons arborescents et 2- mesurer l'impact des perturbations du XX<sup>e</sup> siècle sur la composition forestière.

### III.1.2 Méthode

#### Aire d'étude

La région d'étude, d'une superficie de 1400 km<sup>2</sup>, se situe dans la pointe sud de la péninsule gaspésienne, entre les latitudes 48° 00' N et 48° 20' N et les longitudes 64° 45' W et 65° 45' W (Fig. 3-1a). Le relief est modérément accidenté, formé de basses terres, de coteaux et collines arrondies ainsi que de plateaux d'environ 200 m d'altitude (Robitaille et Saucier 1998). Les altitudes moyenne et maximale sont respectivement de 112 m et 240 m. Le sol est généralement composé d'une roche mère d'origine sédimentaire et de dépôt glaciaire. Le climat est de type subpolaire subhumide, plus doux qu'à l'intérieur de la péninsule gaspésienne. La station météorologique de New Carlisle (Fig. 3-1) enregistre une température annuelle de 3,7 °C, 1096 mm de précipitation dont 23 % tombant sous forme de neige (Environnement Canada 2017).

Selon la classification écologique du Québec, la région est comprise dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune (Grondin *et al.* 1999). La végétation potentielle correspond généralement à la sapinière à bouleau jaune et à l'érablière à bouleau jaune dans les sites à drainage mésique et à la sapinière à thuya et frêne noire ou à la cédrière tourbeuse dans les sites à drainage lent. Quelques tourbières ombrotrophes sont aussi retrouvées sur des plateaux de l'arrière-pays.

Avant l'arrivée des européens, les Algonquiens Mi'kmaq occupaient le littoral de la Baie-des-Chaleurs et les berges de la rivière Bonaventure. Les secteurs de New Carlisle, New Richmond et Bonaventure, trois villages côtiers bordant la Baie-des-Chaleurs, ont été colonisés par des européens à partir de 1740. La région et son arrière-pays ont été progressivement colonisés aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles, par des colons d'origine européenne ou américaine (Blanchard 1930, Desjardins *et al.* 1999, D'amours 2009).

### Jeux de données

La région est divisée en quatre cantons qui ont été arpentés à trois reprises cours des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles. Les arpenteurs ont exploré les cantons et les ont divisés en rangs et lots tout en décrivant la composition des forêts dans des carnets de notes aujourd'hui archivés. Cette étude est basée sur 40 travaux d'arpentages réalisés entre 1830 et 1962 par 20 arpenteurs ayant décrit la composition forestière par 6 493 observations.

Les observations de végétations retrouvées dans les archives d'arpentage correspondent à des descriptions linéaires de composition forestière. À intervalle plus ou moins réguliers, les arpenteurs notaient des énumérations de taxons en ordre décroissant d'importance. Une validation indépendante réalisée dans une région voisine indique que les arpenteurs ordonnaient les taxons selon des critères qui correspondent directement à la surface terrière relative des tiges de plus de trois pouces (7,62 cm) (Terrail *et al.* 2014). Les arpenteurs pouvaient aussi mentionner la présence de coupes, d'incendies, chablis et autres signes de colonisation. Dans ce travail, nous n'avons pas considéré les observations de composition forestière ne référant pas à des taxons précis (« bois mou », « bois mêlé », « jeunes bois », etc.).

La région d'étude a été arpentée à trois reprises entre 1830 et 1962. Le premier arpentage complet de la région a été réalisé entre 1830 et 1869 et compte 3032 observations qui ont été géoréférencées, offrant une première description de la région (Fig. 3-1). Entre 1880 et 1899, trois arpenteurs ont réarpenté l'ensemble des lignes précédemment arpentées, en plus de nouvelles lignes de division du territoire, produisant un total de 1459 observations. Finalement, 16 arpenteurs ont réarpenté le territoire entre 1900 et 1962, produisant 1954 observations. Il faut toutefois mentionner que ce dernier réarpentage ne couvre qu'environ la moitié du territoire (Fig. 3-1).

Les observations des arpenteurs correspondent à des segments ou à des points sur les lignes arpentées. Les observations du XIX<sup>e</sup> siècle sont généralement des points situés plus ou moins régulièrement le long des lignes alors que les observations du XX<sup>e</sup> siècle

correspondent généralement à des segments. Les segments et les points ont respectivement été pondérés par leur longueur et par leur espacement moyen dans le but de les combiner dans la même base de données (Dupuis et al 2011).

Les observations des arpenteurs ont été géoréférencées dans ArcGIS 10.0 (ESRI 2010), à l'aide de cadastres numériques (échelle 1 : 20 000). Nous avons comparé les distances entre des éléments fixes du paysages (*e.g.* cours d'eau encaissés) rapportées par les arpenteurs aux mêmes distances sur les cartes modernes. Pour une ligne arpentée, l'écart entre la distance rapportée par l'arpenteur et la distance mesurée sur la carte moderne est distribué sur toutes les observations proportionnellement à la longueur des observations. Ces écarts indiquent que l'incertitude spatiale moyenne de notre géoréférencement est de 12,3 m par observations. Les observations avec plus de 40 m d'incertitude ont été exclues des analyses (5,4 % des observations).

Quatre inventaires forestiers décennaux du gouvernement du Québec (MFFP 2016a) permettent de décrire la composition forestière de la fin du XX<sup>e</sup> et du début du XXI<sup>e</sup> siècle, suivant des campagnes d'échantillonnage réalisé en 1976, 1987, 1998-2005 et 2008. Ces quatre jeux de données comptent respectivement 270, 294, 1403 et 250 placettes échantillons permanentes et temporaires. Ces inventaires servent normalement à estimer le volume de bois marchand dans la forêt commerciale et sont basés sur des placettes échantillons de 0,04 ha, localisées selon un plan d'échantillonnage aléatoire stratifié. Les sites non forestiers (friche, urbain) et improductifs (milieux humides) ainsi que les sites inaccessibles (pente > 40 %) ne sont pas été échantillonnés. Dans chaque placette, le nombre de tiges, la surface terrière et le volume ont été compilés par espèces et par classe de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) de 2 cm. Puisque les arpenteurs ne différenciaient généralement pas les espèces d'épinettes, de pins, de peupliers et d'érables, nous avons regroupé les espèces de ces genres au sein de chaque placette afin de permettre les comparaisons avec les bases de données des arpenteurs. Dans chaque placette, les surfaces terrières des taxons contribuant au premier 95 % de surface terrière ont été utilisées pour

dresser une liste de taxons présents en ordre décroissant d'abondance, offrant ainsi une base de données directement comparable aux observations des arpenteurs (voir chapitre 1).

L'historique des incendies forestiers du XX<sup>e</sup> siècle a été reconstitué. La base de données d'incendies forestiers du MFFP (2017) a été complétée avec des cartes historiques (échelle 1 : 63 000) basées sur des photographies aériennes de 1927, 1928 et 1938. Les photos de 1927 et 1928 ont été prises de façon verticale tandis que celles de 1938 ont été prises à l'oblique. Les polygones décrivant les contours des zones brûlées ont été géoréférencés avec ArcGIS 10.0 (ESRI 2010). Puisque les limites des polygones d'incendies, tant pour les données du MFFP (2017) que pour les cartes historiques sont relativement imprécises, ces limites ont pu être corrigées pour les faire coïncider aux limites de feux observés par les arpenteurs sur le terrain. Ainsi, les localisations des limites des incendies rapportées par les arpenteurs ont servi de point de contrôle lors du géoréférencement des polygones d'incendies.

L'aménagement forestier récent a été reconstitué en utilisant les cartes écoforestières des quatre inventaires forestiers décennaux du gouvernement du Québec (MFFP 2015). Les activités considérées comprennent les coupes totales, les coupes partielles, les éclaircies commerciales, les éclaircies précommerciales et les plantations. Ces cartes sont basées sur des photographies aériennes (échelle 1 : 20 000) prises respectivement en 1974-1975, 1986, 1992-1993 et 2004 pour les quatre cartes écoforestières, respectivement. Cette reconstitution correspond probablement à l'aménagement forestier réalisé à partir des années 1960, tandis que les activités forestières précédentes demeurent inconnues.

Les polygones de défoliations annuelles par la TBE de 1972 à 1992 ont été utilisés pour cartographier la sévérité de la dernière épidémie (MFFP 2016b). La délimitation des aires défoliées par la TBE a été réalisée à bord d'un avion volant à 240 m d'altitude à environ 160 km/h. Les lignes de vols ont été espacées d'environ 4,8 à 6,4 km. La défoliation a été évaluée annuellement, en observant le pourcentage de perte des aiguilles sur la pousse annuelle des essences hôtes, pour ensuite être classée en défoliation légère, modérée ou grave. Un indice de défoliation totale de la dernière épidémie a été construit à

partir de la somme du nombre d'années de défoliation, pondérées par la sévérité de la défoliation : défoliation annuelle légère = 1; défoliation annuelle modérée = 2; défoliation annuelle grave = 3.

### Analyses

La fréquence et la dominance des taxons dans l'ensemble de la zone d'étude ont été calculées pour chacun des sept jeux de données. Pour chaque taxon et pour chaque jeu de données, la fréquence d'occurrence a été calculée, comme étant le poids total de toutes les observations dans lesquelles le taxon est mentionné, tout rangs confondus, par rapport au poids total de toutes les observations (Scull et Richardson 2007). Des indices de fréquences pour chaque rang d'énumération des taxons ont également été calculés avec la formule suivante :

$$F_{ir} = N_{ir} / M_r$$

où  $F_{ir}$  est la fréquence du taxon  $i$  au rang d'énumération  $r$ ,  $N_{ir}$  est la pondération totale des observations où le taxon  $i$  est mentionné au rang  $r$  et  $M_r$  est la pondération totale des observations mentionnant au moins  $r$  taxons. La dominance réfère à la fréquence au rang 1. La région d'étude a été divisée en 186 cellules de 9 km<sup>2</sup> (3 km × 3 km) et la fréquence des taxons a été calculée dans chaque cellule en utilisant les données du premier, du deuxième et du troisième arpentage ainsi que pour les quatre inventaires modernes combinés. La fréquence d'occurrence des taxons a été calculée seulement dans les cellules contenant quatre observations ou plus, afin de de la représentativité des informations regroupées par cellules. La fréquence de mentions des perturbations a aussi été compilée par cellules pour les coupes, les feux et les mentions de colonisation (tel que « abattis » ou « dégagé » ou « champ »).

Quelques grands incendies forestiers de la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle ont structuré le paysage forestier, particulièrement le grand incendie de 1924 de la rivière

Bonaventure (BAEQ 1966, Fortin 2008, Chapitre 2). Afin de considérer ce phénomène et d'en mesurer l'ampleur, des indices de perturbation et de composition forestière ont été comparés entre les secteurs incendiés et les secteurs épargnés des incendies. Les fréquences des coupes totales et des coupes partielles ont été mesurées selon la proportion de territoire où ces coupes sont identifiées dans au moins une carte écoforestière d'un inventaire forestier décennal par rapport à la superficie du territoire. La densité de chemins a été calculée en divisant la longueur des chemins photointerprétés dans la carte écoforestière du quatrième inventaire forestier décennal par la superficie totale du territoire. La fréquence de peuplements feuillus, mélangés et conifériens a été mesurée à partir de la carte écoforestière du quatrième inventaire forestier décennal. La fréquence d'occurrence moderne des taxons arborescents a été calculée à partir des placettes échantillons des quatre inventaires forestiers décennaux. Finalement, l'indice de défoliation par la TBE a été moyenné pour les secteurs incendiés et non incendiés.

### III.1.3 Résultats

Les taxons peuvent être classés en deux groupes selon que leur fréquence ait augmenté ou diminué entre le premier et le dernier jeu de données (Fig. 3-2). La fréquence du sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill), des épinettes (*Picea* spp. Mill), du bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.), des peupliers (*Populus* spp. L.) et des érables (*Acer* spp. L.) a augmentée alors que celle des pins (*Pinus* spp. L.) et du bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Brit) a diminué. La fréquence du thuya occidental (*Thuja occidentalis* L.) a fluctué entre 20 % et 50 % d'un jeu de données à l'autre, sans tendance directionnelle nette. La hausse de fréquence du sapin, des épinettes et du bouleau à papier a été progressive comparativement à une augmentation abrupte pour le peuplier et pour l'érable, respectivement au début et dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle. La fréquence des pins a chuté drastiquement au début du XX<sup>e</sup> siècle. Les changements de fréquence du bouleau jaune sont inversés par rapport à ceux de l'érable, avec une chute marquée au milieu du XX<sup>e</sup> siècle.

Les données montrent aussi que les changements de fréquence des taxons dans le temps ont été accompagnés de changement dans leurs patrons spatiaux d'abondance (Fig. 3-3). Le sapin baumier et les épinettes ont occupés l'ensemble du territoire depuis le premier inventaire et sont demeurés presque partout les taxons avec la plus forte fréquence d'occurrence. De même, les augmentations de fréquence du bouleau à papier, des peupliers et des érables, et la diminution du bouleau jaune, ont été généralisées à travers l'ensemble de la région d'étude. Par contre, le thuya occidental a constamment présenté une fréquence plus élevée dans le sud-ouest de la région, même s'il a été présent dans une majorité de cellules depuis le premier inventaire. Finalement, la fréquence élevée des pins lors des deux premiers inventaires est confinée à deux secteurs bien définis.

La fréquence et l'étendue des perturbations sévères semblent avoir augmenté avec la progression de la colonisation. Dans les deux premiers jeux de données, les mentions d'incendies, de coupes et de colonisations étaient restreintes et localisées (Fig. 3-4). De

plus, toutes les mentions de colonisation étaient concentrées à moins de 10 km de la Baie-des-Chaleurs. Les mentions de feux des archives d'arpentage (Fig. 3-4) de même que les feux cartographiés (Fig. 3-5) indiquent que la fréquence et l'étendue des feux ont beaucoup augmenté dans le troisième jeu de données pour diminuer et presque complètement disparaître par la suite. Les feux les plus importants sont survenus dans les décennies 1890 et 1920 (Fig. 3-5). Les mentions de coupes des archives d'arpentage suggèrent une première période de récolte forestière limitée à la zone côtière avant 1960. Par la suite, les inventaires forestiers modernes indiquent des activités forestières soutenues, sous la forme de coupes partielles et de coupes totales, à l'exception des secteurs incendiés (Fig. 3-5 et Table 3-1).

En plus de cette différence de répartition des parterres de coupes, le territoire forestier présente plusieurs différences dans sa structure et sa composition selon qu'il ait été incendié ou non. Les secteurs incendiés depuis 1890 présentent une densité de chemins plus faibles et ont été défoliés moins sévèrement que les secteurs non-incendiés. En même temps, le couvert forestier des secteurs incendiés est davantage feuillu que dans les secteurs non incendiés. La fréquence d'occurrence des taxons arborescents dans les placettes d'inventaires modernes est significativement différente entre les secteurs incendiés et non-incendiés pour tous les taxons, excepté le pin blanc (test de chi carré,  $\alpha = 0,05$ ).

### III.1.4 Discussion

Cette étude décrit la transformation progressive d'une forêt tempérée préindustrielle pendant 180 ans, en utilisant deux catégories de données réparties sur sept périodes temporelles sur la composition forestière et les perturbations d'une même région à différentes époques. Peu d'études ont pu procéder à de telles reconstitutions, en raison du manque de données adéquates (Likens 1989). Les précédentes études de reconstitution réalisées dans l'est de l'Amérique du Nord n'ont utilisé que deux jeux de données, comparant la composition forestière entre deux époques différentes (Brisson et Bouchard 2003, Friedman et Reich 2005, Pinto *et al.* 2008, Barrette *et al.* 2010, Dupuis *et al.* 2011, Danneyrolles *et al.* 2016a). Ces études ont généralement documenté l'augmentation des feuillus opportunistes, tels que les peupliers, le bouleau à papier et les érables, au détriment du thuya occidental, des pins, de la pruche du Canada (*Tsuga canadensis* (L.) Carrière) et du hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.).

Cette étude a été possible en raison du caractère unique de l'arpentage de la région, arpentée à trois reprises. Même si des situations de réarpentage sont retrouvées ailleurs, celles-ci ne sont généralement restreintes qu'à quelques lignes de division du territoire, tandis que l'ensemble de la présente région d'étude a été réarpentée, une fois en intégralité entre 1880 et 1899 ainsi qu'une seconde fois en partie entre 1900 et 1962. Selon les arpenteurs Bourget, Girard, Roy (1880-1899) et Michaud (1931), il semblerait que la colonisation ait tardé suivant le premier arpentage de la région et que les lignes de division aient été perdues, par régénération dans ces lignes dégagées lors du premier arpentage, d'où la nécessité du réarpentage.

L'utilisation de sept jeux de données indépendants a permis de confirmer les tendances de transformation de composition forestière précédemment documentée dans d'autres régions (Dupuis *et al.* 2011, Vadeboncoeur *et al.* 2012, Thompson *et al.* 2013) ou dans la région d'étude (Pinna *et al.* 2009a, Chapitre 1 et 2) et d'en documenter la chronologie. Plusieurs changements de fréquence ont été soudains, notamment la chute des

pins et du bouleau jaune ainsi que l'augmentation des peupliers et des érables. L'augmentation de la fréquence du bouleau à papier, pour sa part, a été progressive. La diminution de la fréquence du bouleau jaune a eu lieu au milieu du XX<sup>e</sup> siècle, en même temps que l'augmentation des érables. La fréquence du bouleau jaune semble être stabilisée depuis les dernières décennies (Fig. 3-2) tandis que les pins ne montrent pas de signe de rétablissement dans la région. La dominance du sapin baumier varie de façon importante d'un jeu de données à l'autre. Toutefois, cette dominance dans le premier jeu de données d'arpentage et dans les trois derniers jeux de placettes est très similaire. Cette situation illustre que si nous avons utilisé seulement ces jeux de données, ce signal de forte variabilité dans la dominance du sapin baumier n'aurait pas pu être documenté.

Ces changements témoignent de l'anthropisation progressive de la région au cours du XX<sup>e</sup> siècle (Fortin 2008, Dupuis *et al.* 2011, Terrail 2013). Le contexte régional de climat stable au XX<sup>e</sup> siècle facilite l'interprétation des causes des changements de composition. L'augmentation de la fréquence et de la dominance du sapin baumier entre les jeux de données reflète la capacité de cette essence à croître sur une grande diversité de condition de sites et d'avoir une bonne régénération après perturbations, notamment les coupes forestières (Webb 1957, 1961, Vincent 1962, MacArthur 1963, Hatcher 1964). D'ailleurs « l'envahissement des parterres de coupes par le sapin baumier » est un enjeu local (Grondin *et al.* 2003a). La diminution de la dominance du sapin baumier dans les quatre derniers jeux de données pourrait être attribuable à la défoliation par la dernière épidémie de TBE, qui a sévi dans la région entre 1972 et 1992 (Duchesne et Ouimet 2008). De plus, certaines pratiques forestières récentes comme l'éclaircie précommerciale, le nettoyage et le dégagement de la végétation peuvent limiter la proportion de sapin baumier dans les peuplements (Gauthier et Varady-Szabo 2014).

La diminution subite du pin blanc (*Pinus strobus* L.) et du pin rouge (*Pinus resinosa* Ait.) au XX<sup>e</sup> siècle est généralisée à l'ensemble de leur aire de distribution (Thompson *et al.* 2006, Mauri Ortuno 2010). Cette diminution est habituellement attribuée aux coupes forestières du XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècle qui ciblaient spécifiquement les pins matures pour la

construction navale. De plus, les incendies subséquents pourraient alors avoir éliminé la régénération de pins préétablie, ceux-ci étant trop jeunes pour résister aux incendies (Mauri Ortuno 2010).

Malgré la diminution rapportée du thuya occidental dans l'est de son aire de répartition (Bergeron et Charron 1994; Heitzman *et al.* 1997, Larouche 2006, Dupuis *et al.* 2009, chapitre 1 et 2) et malgré les nombreuses perturbations qui ont eu lieu au XX<sup>e</sup> siècle, la fréquence et la dominance du thuya occidental dans la région ne présentent pas de tendance claire à la diminution. Dans les placettes modernes, on observe que le thuya occidental est peu fréquent dans les secteurs incendiés (Table 3-1). Toutefois, la fréquence du thuya à l'extérieur des incendies est relativement élevée (42 %). Cela pourrait être encore dû à des aménagements en coupe partielle fréquemment employés dans cette région, auxquels répond bien le thuya occidental, tant en croissance qu'en régénération (Hébert et Fortin 2003, Hébert 2004a, b). De plus, plusieurs secteurs dans la région ont un drainage lent et sont dominés par le thuya occidental, comptant pour environ 6 % du territoire forestier productif selon le dernier inventaire forestier décennal (MFFP 2016) Ces secteurs montrent une importante résilience aux perturbations, notamment par la bonne multiplication par marcottage du thuya occidental (Larouche 2006, Hébert 2007a, b).

Les feuillus intolérants, soit le bouleau à papier et les peupliers, montrent d'importantes augmentations dans la région. On observe une augmentation constante de la fréquence du bouleau à papier, d'un jeu de données à l'autre, ce qui est conséquent avec sa capacité à se régénérer de façon abondante après perturbations (Bergeron 2000, Grondin *et al.* 2003b, Fortin, 2008). La fréquence des peupliers a augmenté rapidement au cours du XX<sup>e</sup> siècle, ce qui peut être attribuable à l'ajout soudain des feux anthropiques dans la dynamique forestière régionale (Fortin 2008, Terrail 2013). Les peupliers, surtout le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.), sont connus pour avoir une régénération prolifique suivant un incendie forestier, tant par régénération sexuée que par drageonnement (Graham 1963, Romme *et al.* 1997, Fortin 2008).

La diminution du bouleau jaune depuis l'époque préindustrielle a précédemment été documentée et été attribuée aux incendies et aux coupes forestières (Brisson et Bouchard 2003, Dupuis *et al.* 2011). Même si le bouleau jaune peut se régénérer après perturbation totale, la compétition interspécifique avec d'autres espèces de feuillus de lumière, comme le peuplier faux tremble, le bouleau à papier ou le cerisier de Pennsylvanie (*Prunus sylvanica* L.) limitent sa régénération. La stabilisation de la fréquence du bouleau jaune documentée dans cette étude pourrait être liée à l'utilisation croissante des pratiques sylvicoles à fine échelle, adaptées au bouleau jaune (Willis et Johnson 1978, Beaudet et Messier 1997, Archambault *et al.* 2006).

En même temps que la fréquence du bouleau jaune a chuté, celle des érables a augmenté, soit dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle (Fig. 3-2). Plus précisément, ce changement coïncide avec le changement de type de données (archive d'arpentage *vs.* placettes modernes). Cependant, puisque les changements de fréquence des autres taxons ont lieu à des périodes différentes, il paraît peu probable que ce signal soit un biais méthodologique, mais qu'il reflète plutôt une réalité écologique. Par exemple, on constate que l'augmentation des peupliers a eu lieu subitement entre le deuxième et le troisième arpentage, au même moment où les pins ont pratiquement disparu. L'augmentation du bouleau est maximale entre le premier et le deuxième arpentage. Puisque les changements de fréquences semblent survenir à différents moments, indépendamment du changement de type de données, nous concluons que ces changements ne reflètent pas le changement de méthodologie mais bien un signal écologique.

La fréquence préindustrielle des érables est connue seulement pour le genre *Acer*, sans distinction des espèces puisque les arpenteurs les différenciaient rarement. Cette fréquence varie de 15 % à 20 % dans les trois premiers jeux de données (Fig. 3-2). La fréquence moderne de l'érable rouge est de 51 % et 43 %, sur les secteurs incendiés et non incendiés, respectivement (Table 3-1). Conséquemment, même si la fréquence préindustrielle de l'érable rouge est inconnue, on peut affirmer qu'elle a augmenté au cours du XX<sup>e</sup> siècle. La fréquence moderne de l'érable à sucre est de 9 % et 15 %, sur les secteurs

incendiés et non incendiés, respectivement. Il n'est donc pas possible d'affirmer hors de tout doute que la fréquence de l'érable à sucre a augmenté dans la région. Cette fréquence pourrait avoir augmenté, diminué ou être demeurée stable, dépendamment de la fréquence préindustrielle. Ce résultat contraste avec ceux rapportés par d'autres études où l'érable à sucre a augmenté (Brisson et Bouchard 2003, Nolet *et al.* 2008, Dupuis *et al.* 2011), puisque dans notre étude l'augmentation des érables est majoritairement attribuable à l'érable rouge. L'augmentation de l'érable rouge a été documentée et interprétée comme étant conséquence au contrôle des incendies forestiers (Abrams 1998, Hanberry *et al.* 2012, Nowacki et Abrams 2015) ou aux perturbations anthropiques récentes (Fei et Steiner 2007, 2009; Boucher *et al.* 2017). Dans la péninsule gaspésienne, le climat est demeuré stable au XX<sup>e</sup> siècle (Yagouti *et al.* 2006, 2008; voir chapitre 2) tandis que de nombreuses perturbations anthropiques ont eu lieu. Cette situation pourrait être favorable particulièrement à l'érable rouge, tandis que l'augmentation de l'érable à sucre pourrait nécessiter un certain changement climatique en plus des perturbations anthropiques, du moins à l'interface tempéré boréal. De plus, l'érable à sucre nécessite des sols plus riches pour sa germination et sa survie que l'érable rouge (Godman *et al.* 1990, Anseau *et al.* 1995, St-Clair et Lynch 2005). Les sols pauvres pourraient limiter la progression de l'érable à sucre, tout en étant suffisamment riches pour l'érable rouge.

Les deux secteurs avec la plus grande abondance de pins (Fig. 3-3) dans les premiers arpentages correspondent probablement à des secteurs anciennement incendiés (Maissurow 1935, Lorimer 2008). Inversement, la faible occurrence du peuplier faux-tremble pourrait être un indice d'une faible fréquence d'incendies. De plus, peu d'incendies ont été mentionnés par les arpenteurs des deux premiers jeux de données. L'arpenteur MacDonald, lors de l'arpentage du canton Cox en 1836, a noté un ancien incendie dans le nord-ouest du canton, tant sur ses cartes que dans le carnet d'arpentage (voir Annexe S3-1). L'arpenteur a d'ailleurs mentionné explicitement que cet incendie était un des seuls à avoir sévi dans la région. De plus, les incendies mentionnés par les arpenteurs du XX<sup>e</sup> siècle (Fig. 3-4) correspondent à ceux reconstitués à partir des cartes historiques (Fig. 3-5). Puisque le maintien et la régénération des pins nécessitent généralement des incendies (Maissurow

1935), ceux-ci devaient être présents dans la dynamique préindustrielle. En même temps, les taxons adaptés aux incendies fréquents, tels les peupliers et le bouleau à papier, étaient peu abondants. Pour ces raisons, il semble que la récurrence naturelle des incendies à l'époque préindustrielle devait être suffisamment élevée pour assurer le maintien des pins, mais suffisamment faible pour limiter le recrutement des peupliers et du bouleau à papier.

Les incendies du XX<sup>e</sup> siècle ont structuré les changements de paysage, la composition et la dynamique forestière régionale. En plus de permettre un important recrutement d'essences pyrophiles, les grands incendies, particulièrement celui de 1924, ont servi de canevas pour l'évolution du territoire (Table 3-1 et Fig. 3-5). Les incendies ont rajeuni la forêt et éliminé le bois commercial sur de grands secteurs. Les coupes forestières ont alors été concentrées dans les secteurs non incendiés dans les premiers 80 ans suivant l'incendie. Une plus forte densité de chemins est retrouvée dans les secteurs non incendiés, soit la forêt aménagée. Ces chemins ont fragmenté le massif forestier et ont pu permettre le maintien de feuillus intolérants sur l'ensemble du territoire (Fortin 2008, Perrotte-Caron *et al.* 2012). Ce maintien de semenciers près des routes forestières a pu rendre la région susceptible à l'envahissement par ces feuillus intolérants suivant les perturbations (Fortin 2008). Les secteurs récemment incendiés au XX<sup>e</sup> siècle, en ayant une composition forestière essentiellement feuillue et un couvert forestier équien, ont eu une susceptibilité envers la TBE plus faible que des secteurs non incendiés (Crook *et al.* 1979, SOPFIM 1992, MacKinnon et MacLean 2003, Bouchard *et al.* 2005, MacLean et Andersen 2008). Cette faible susceptibilité a influencé à son tour la dynamique forestière de ces secteurs de même que l'aménagement du territoire, puisque ces secteurs à susceptibilité plus faible ont été moins pulvérisés par insecticides et ont subi moins de coupe de récupération (SOPFIM 2011). Ce phénomène est rencontré en Gaspésie et au Bas-Saint-Laurent, où les feux sont les principaux agents de changements globaux qui ont structuré le territoire (Terrail 2013). La transformation des paysages par des incendies anthropiques suivant l'occupation du territoire est un phénomène global, également visible dans le sud de la Gaspésie (Bowman *et al.* 2011).

### **III.1.5 Remerciements**

Cette étude a été financée par le FRQNT, la Chaire de Recherche sur la Forêt Habitée et le Groupe BOREAS.

### III.1.6 Références

- ABRAMS, Marc D. et Charles M. RUFFNER. 1995. « Physiographic analysis of witness-tree distribution (1765-1798) and present forest cover through north central Pennsylvania ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 25, numéro 4, pp. 659-668.
- ABRAMS, Marc D. 1998. « The red maple paradox: What explains the widespread expansion of red maple in eastern forests? ». *BioScience*, volume 48, numéro 5, pp. 355-364.
- ANSEAU, Colette. 1995. « L'érable à sucre : Caractéristiques, écologie et aménagement ». Ministère des Ressources naturelles, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. Québec. 394 p.
- ARCHAMBAULT, Louis, Claude DELISLE, Guy R. LAROCQUE, Luc SIROIS et Pierre BELLEAU. 2006. « Fifty years of forest dynamics following diameter-limit cuttings in balsam fir - yellow birch stands of the Lower St. Lawrence region, Quebec ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 36, numéro 11, pp. 2745-2755.
- BARRETTE, Martin, Louis BÉLANGER et Louis DE GRANPRÉ. 2010. « Preindustrial reconstruction of a perhumid midboreal landscape, Anticosti Island, Quebec ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 40, numéro 5, pp. 928-942.
- BEAUDET, Marilou et Christian MESSIER. 1997. « Le bouleau jaune en peuplement feuillus et mixtes : autoécologie, dynamique forestière et pratiques sylvicoles ». Revue de littérature préparée pour la Forêt Modèle du Bas-Saint-Laurent. Groupe de recherche en écologie forestière (GREF), Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec. 56 p.
- BERGERON, Yves. 2000. « Species and stand dynamics in the mixed woods of Quebec's southern boreal forest ». *Ecology*, volume 81, numéro 6, pp. 1500-1516.
- BERGERON, Yves et Danielle CHARRON. 1994. « Postfire stand dynamics in a southern boreal forest (Québec): a dendroecological approach ». *Écoscience*, volume 1, numéro 2, pp. 173-184.
- BLANCHARD, Raoul. 1930. « Études canadiennes : I. La presqu'île de Gaspé ». *Revue de Géographie Alpine*, volume 18, numéro 1, pp. 5-112.

- BOUCHARD, Mathieu, Daniel D. KNEESHAW et Yves BERGERON. 2005. « Mortality and stand renewal patterns following the last spruce budworm outbreak in mixed forests of western Quebec ». *Forest Ecology and Management*, volume 204, numéro 2-3, pp. 297-313.
- BOUCHER, Yan, Dominique ARSENEAULT, Luc SIROIS et Louis BLAIS. 2009. « Logging pattern and landscape changes over the last century at the boreal and deciduous forest transition in Eastern Canada ». *Landscape Ecology*, volume 24, numéro 2, pp. 171-184.
- BOUCHER, Yan, Mathieu BOUCHARD, Pierre GRONDIN et Patrice TARDIF. 2011. « Le registre des états de référence : intégration des connaissances sur la structure, la composition et la dynamique des paysages forestiers naturels du Québec méridional ». Gouvernement du Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. Direction de la recherche forestière. 21 p.
- BOUCHER, Yan, Maude PERRAULT-HÉBERT, Richard FOURNIER, Pierre DRAPEAU et Isabelle AUGER. 2017. « Cumulative patterns of logging and fire (1940-2009): consequences on the structure of the eastern Canadian boreal forest ». *Landscape Ecology*, volume 32, numéro 2, pp. 361-375.
- BOUDREAU, Claude et Michel GAUDREAU. 2007. « Le Québec sous l'oeil de l'arpenteur-géomètre depuis Champlain ». Les Publications du Québec. Québec 140 p.
- BOWMAN, David M. J. S., Jennifer BALCH, Paulo ARTAXO, William J. BOND, Mark A. COCHRANE, Carla M. D'ANTONIO, Ruth DEFRIER, Fay H. JOHNSTON, Jon E. KEELY, Meg A. KRAWCHUK, Christian A. KULL, Michelle MACK, Max A. MORITZ, Stephen PYNE, Christopher I. ROOS, Andrew C. SCOTT, Navjot S. SODHI et Thomas W. SWETNAM. 2011. « The human dimension of fire regimes on Earth ». *Journal of Biogeography*, volume 38, numéro 12, pp. 2223-2236.
- BRISSON, Jacques et André BOUCHARD. 2003. « In the past two centuries, human activities have caused major changes in the tree species composition of southern Québec, Canada ». *Écoscience*, volume 10, numéro 2, pp. 236-246.
- BUREAU D'AMÉNAGEMENT DE L'EST DU QUÉBEC (BAEQ). 1966. « Atlas régional du Bas-St-Laurent, de la Gaspésie et des Îles-de-la-Madeleine ». Mont-Joli, Québec. 136 p.

- CHRISTENSEN, Norman L., Ann M. BARTUSKA, James H. BROWN, Stephen CARPENTER, Carla D'ANTONIO, Rober FRANCIS, Jerry F. FRANKLIN, James A. MACMAHON, Reed F. NOSS, David J. PARSONS, Charles H. PETERSON, Monica G. TURNER et Robert G. WOODMANSEE. 1996. « The report of the Ecological Society of America committee on the scientific basis for ecosystem management ». *Ecological Applications*, volume 6, numéro 3, pp. 665-691.
- COGBILL, Charles V., John BURK et Glenn MOTZKIN. 2002. « The forests of presettlement New England, USA: spatial and compositional patterns based on town proprietor surveys ». *Journal of Biogeography*, volume 29, numéro 10-11, pp. 1279-1304.
- CROOK Gregory W., Paul E. VÉZINA et Yvan HARDY. 1979. « Susceptibility of balsam fir to spruce budworm defoliation as affected by thinning ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 9, numéro 3, pp. 428-435.
- CYR, Dominique, Sylvie GAUTHIER, Yves BERGERON et Christopher CARCAILLET. 2009. « Forest management is driving the eastern North American boreal forest outside its natural range of variability ». *Frontiers in Ecology and Environment*, volume 7, numéro 10, pp. 519-524.
- D'AMOURS, Catherine. 2009. « Établissement et évolution des populations gaspésiennes au XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles ». Mémoire de maîtrise en sciences géographiques. Québec : Université Laval. 142 p.
- DANNEYROLLES, Victor, Dominique ARSENEAULT et Yves BERGERON. 2016a. « Pre-industrial landscape composition patterns and post-industrial changes at the temperate-boreal forest interface in western Quebec, Canada ». *Journal of Vegetation Science*, volume 27, numéro 3, pp. 470-481.
- DANNEYROLLES, Victor, Dominique ARSENEAULT et Yves BERGERON. 2016b. « Long-term compositional changes following partial disturbance revealed by the resurvey of logging concession limits in the northern temperate forest of eastern Canada ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 46, numéro 7, pp. 943-949.
- DESJARDINS, Marc, Yves FRENETTE, Jules BÉLANGER et Bernard HÉTU. 1999. « Histoire de la Gaspésie, deuxième édition ». Institut Québécois de Recherche sur la Culture, Québec. 795 p.

- DUCHESNE, Louis et Rock OUIOMET. 2008. « Population dynamics of tree species in southern Quebec, Canada: 1970-2005 ». *Forest Ecology and Management*, volume 255, numéro 7, pp. 3001-3012.
- DUPUIS, Sébastien, Dominique ARSENEAULT et Luc SIROIS. 2011. « Change from pre-settlement to present-day forest composition reconstructed from early land survey records in eastern Québec, Canada ». *Journal of Vegetation Science*, volume 22, numéro 3, pp. 564-575.
- ENVIRONNEMENT CANADA. 2017. « Normales climatiques au Canada 1971-2000 ». Services météorologiques du Canada. En ligne. [http://www.msc.ec.gc.ca/climate/climate\\_normals](http://www.msc.ec.gc.ca/climate/climate_normals). Consulté le 16 janvier 2017.
- FEI, Songlin et Kim C. STEINER. 2007. « Evidence for increasing red maple abundance in the Eastern United States ». *Forest Science*, volume 53, numéro 4, pp. 473-477.
- FEI, Songlin et Kim C. STEINER. 2009. « Rapid capture of growing space by red maple ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 36, numéro 8, pp. 1444-1452.
- FORTIN, Sylvain. 2008. « Expansion postcoloniale du tremble (*Populus tremuloides*) dans le bassin de la rivière York, en Gaspésie ». Thèse de doctorat en science de l'environnement. Chicoutimi : Université du Québec à Chicoutimi, 103 p.
- FOSTER, David R. et John D. ABER. 2004. « Forests in time: the environmental consequences of 1,000 years of change in New England ». Yale University Press, New Haven, Connecticut. 477 p.
- FRELICH, Lee E. 2008. « Forest Dynamics and Disturbance Regimes. Studies from Temperate Evergreen-Deciduous Forests ». Cambridge Studies in Ecology. Cambridge University Press, New-York, États-Unis. 280 p.
- FRIEDMAN, Steven K. et Peter B. REICH. 2005. « Regional legacies of logging: departure from presettlement forest conditions in northern Minnesota ». *Ecological Applications*, volume 15, numéro 2, pp. 726-744.
- GAUTHIER, Sylvie, Marie-Andrée. VAILLANCOURT, Alain LEDUC, Louis DE GRANDPRÉ, Daniel D. KNEESHAW, Hubert MORIN, Pierre DRAPEAU et Yves BERGERON. 2008 « Aménagement écosystémique en forêt boréale ». Presses de l'Université du Québec, Québec. 600 p.

- GAUTHIER Louis, et Hironnelle VARADY-SZABO. 2014. « Opportunités et perspectives d'avenir de l'éclaircie précommerciale en Gaspésie ». Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Gaspé, Québec. 99 p.
- GODMAN, Richard M., Harry W. YAWNEY et Carl H. TUBBS. 1990. « *Acer saccharum* Marsh. Sugar maple ». Dans *Silvics of North America. Vol. 2, Hardwoods*, sous la dir. De Russell M. Burns et Barbara H. Honkala, pp. 78-91. USDA, Washington, DC.
- GRAHAM, Samuel A. 1963. « Aspens: phoenix trees of the Great Lakes region ». University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan. 272 p.
- GRONDIN, Pierre, Jacques BLOUIN et Philippe RACINE. 1999. « Rapport de classification écologique du sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune de l'est ». Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Direction des inventaires forestiers, Québec. 198 p.
- GRONDIN, Pierre, Jean NOËL et Denis HOTTE. 2003a. « Envahissement des parterres de coupe par le sapin en forêt boréale ». Dans *Les enjeux de biodiversité relatifs à la composition forestière*, sous la dir. de Pierre Grondin et Agathe Cimon, pp. 15-44. Ministère des Ressources naturelles, de la faune et des parcs, Direction de la recherche forestière et Direction de l'environnement forestier, Québec.
- GRONDIN, Pierre, Louis BÉLANGER, Vincent ROY, Jean NOËL et Denis HOTTE. 2003b. « Envahissement des parterres de coupe par les feuillus de lumière (enfeuillage) ». Dans *Les enjeux de biodiversité relatifs à la composition forestière*, sous la dir. de Pierre Grondin et Agathe Cimon, pp. 131-174. Ministère des Ressources naturelles, de la faune et des parcs, Direction de la recherche forestière et Direction de l'environnement forestier, Québec.
- HANBERRY, Brice B., Brian J. PALIK et He S. HONG. 2012. « Comparison of historical and current forest surveys for detection of homogenization and mesophication of Minnesota forests ». *Landscape Ecology*, volume 27, numéro 10, pp. 1495-1512.
- HATCHER, Robert J. 1964. « Balsam fir advance growth after cutting in Québec ». *The Forestry Chronicle*, volume 40, numéro 1, pp. 86-92.
- HÉBERT, Barbara. 2004a. « Études sur *Thuja occidentalis* dans des cédrières de la Gaspésie : 1. Acquisition de connaissances en vue de développer des stratégies sylvicoles favorisant le retour du thuya et 2. Impacts des coupes totales sur les tiges résiduelles du thuya ». Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Gaspé, Québec. 65 p.

- HÉBERT, Barbara. 2004b. « Études sur *Thuja occidentalis* dans des cédrières de la Gaspésie: Mesure de la réaction du thuya à l'éclaircie commerciale et suivi, après 2 ans, d'essais de plantation et d'ensemencement ». Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles. 44 p.
- HÉBERT, Barbara. 2007a. « Caractérisation de la régénération et des lits de germination des semis de *Thuja occidentalis* dans une vieille cédrière en Gaspésie, Québec, Canada ». Mémoire de maîtrise en ressources renouvelables. Chicoutimi : Université du Québec à Chicoutimi. 65 p.
- HÉBERT, Barbara. 2007b. « Dynamique de la régénération de *Thuja occidentalis* L. dans de vieilles cédrières mésiques de la Gaspésie » Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Gaspé, Québec. 43 p.
- HÉBERT, Barbara et Sylvain FORTIN. 2003. « Étude sur *Thuja occidentalis* dans des cédrières de la Gaspésie: Croissance de *Thuja occidentalis*, impacts du feu sur la qualité des tiges de thuya, examen de la survie des thuyas résiduels isolés ou en petits groupes après coupe et essais d'assistance à la régénération du thuya ». Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Gaspé, Québec. 80 p.
- HEITZMAN, Eric, Kurt S. PREGITZER, Raymond O. MILLER, Mike LANASA et Mike ZUIDEMA. 1999. « Establishment and development of northern white-cedar following strip clearcutting ». *Forest Ecology and Management*, volume 123, numéro 2-3, pp. 97-104.
- KEANE, Robert E., Paul F. HESSBURG, Peter B. LANDRES et Fred J. SWANSON. 2009. « The use of historical range and variability (HRV) in landscape management ». *Forest Ecology and Management*, volume 258, numéro 7, pp. 1025-1037.
- LAROUCHE, Catherine. 2006. « Raréfaction du thuya ». Dans *Les enjeux de biodiversité relatifs à la composition forestière*, sous la dir. de Pierre Grondin et Agathe Cimon, 32 p. Ministère des Ressources Naturelles de la Faune et des Parcs, Gouvernement du Québec, Québec.
- LORIMER, Craig G. 2001. « Historical and ecological roles of disturbance in eastern North American forests: 9,000 years of change ». *Wildlife Society Bulletin*, volume 29, numéro 2, pp. 425-439.
- LORIMER, Craig G. 2008. « Eastern white pine abundance in 19th century forests: A reexamination of evidence from land surveys and lumber statistics ». *Journal of Forestry*, volume 106, numéro 5, pp. 253-260.

- MACARTHUR, James D. 1963. « Effect of mechanized logging on the composition of balsam fir stand in the Gaspé peninsula ». *Pulp and Paper Magazine of Canada*, Woodland Review Section, Avril, pp. 208-210.
- MACKINNON, Wayne E. et David A. MACLEAN. 2003. « The influence of forest and stand conditions on spruce budworm defoliation in New Brunswick, Canada ». *Forest Science*, volume 49, numéro 5. pp. 657-667.
- MACLEAN, David A. et Allison R. ANDERSEN. 2008. « Impact of a spruce budworm outbreak in balsam fir and subsequent stand development over a 40-year period ». *The Forestry Chronicle*, volume 84, numéro 1. pp. 60-69.
- MAISSUROW, Donald K. 1935. « Fire as a necessary factor in the perpetuation of white pine ». *Journal of Forestry*, volume 33, numéro 4, pp. 373-378.
- MARTEL, Fernand et Gérard TANGUAY. 1982. « L'arpentage primitif : plus de 350 ans d'histoire » Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de l'arpentage, 12 p.
- MAURI ORTUNO, Eduard. 2010. « Modélisation de la distribution précoloniale du pin blanc en Moyenne-Mauricie à partir des carnets d'arpentage ». Mémoire de maîtrise en foresterie. Québec : Université Laval. 89 p.
- MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS (MFFP). 2015. « Norme de stratification écoforestière, quatrième inventaire écoforestier du Québec méridional ». Direction des inventaires forestiers. Gouvernement du Québec, Québec. 101 p.
- MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS (MFFP). 2016a. « Normes d'inventaire forestier, placettes-échantillons temporaires. Normes techniques ». Direction des inventaires forestiers. Gouvernement du Québec, Québec. 172 p.
- MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS (MFFP). 2016b. « Données sur les perturbations naturelles – insectes : tordeuse des bourgeons de l'épinette ». Base de données ouvertes québécoises. Direction de la protection des forêts. Gouvernement du Québec, Québec.
- MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS (MFFP). 2017. « Base de données sur les feux de forêt (1940 à 2007) ». Gouvernement du Québec, Québec.

- MORGAN, Penelope, Gregory H. APLET, Jonathan B. HAUFLE, Hope C. HUMPHRIES, Margaret M. MOORE et W. Dale WILSON. 1994. « Historical range of variability: a useful tool for evaluating ecosystem change ». *Journal of Sustainable Forestry*, volume 2, numéro 1, pp. 87-111.
- NOWACKI, Gregory J. et Marc D. ABRAMS. 2015. « Is climate an important driver of post-European vegetation change in the Eastern United States? ». *Global Change Biology*, volume 21, numéro 1, pp. 314-334.
- OLIVER, Chadwick D. et Bruce C. LARSON. 1996 « Forest stand dynamics ». Wiley, New York. 520 p.
- PERROTTE-CARON, Olivier, Hironnelle VARADY-SZABO et Annie MALENFANT. 2012. « Portrait de l'organisation spatiale du territoire forestier gaspésien définie d'après la mesure de l'intensité de la fragmentation et de la connectivité des forêts ». Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Gaspé, Québec. 59 p.
- PINNA, Samuel, Annie MALENFANT, Barbara HÉBERT et Mathieu CÔTÉ. 2009a. « Portrait forestier historique de la Gaspésie ». Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Gaspé, Québec. 203 p.
- PINNA, Samuel, Hugo JACQMAIN, Mathieu BOUCHARD, Yan BOUCHER, Martin BARRETTE et Mathieu CÔTÉ. 2009b. « Aménagement écosystémique des forêts au Québec - Guide d'élaboration d'un portrait de la forêt préindustrielle comme paysage naturel de référence ». Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles et ministères des Ressources naturelles et de la Faune, Québec. 28 p.
- PINTO, Fred, Stephen ROMANIUK et Murray FERGUSON. 2008. « Changes to preindustrial forest tree composition in central and northeastern Ontario, Canada ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 38, numéro 7, pp. 1842-1854
- ROBITAILLE, André et Jean-Pierre SAUCIER. 1998. « Paysage régionaux du Québec méridional ». Direction de la Gestion des Stocks Forestiers et Direction des Relations Publiques, Ministère des Ressources Naturelles du Québec. Publication du Québec, Québec. 213 p.
- ROMME, William H., Monica G. TURNER, Robert H. GARDNER, William W. HARGROVE, Gerald A. TUSKAN, Don G. DESPAIN et Roy. A. RENKIN. 1997. « A rare episode of sexual reproduction in Aspen (*Populus tremuloides* Michx) following the 1988 Yellowstone fires ». *Natural Areas Journal*, volume 17, numéro 1, pp. 17-25.

- ROMPRÉ, Ghislain, Yan BOUCHER, Louis BÉLANGER, Sylvie CÔTÉ et Douglas W. ROBINSON. 2010. « Conserving biodiversity in managed forest landscapes: The use of critical thresholds for habitat ». *The Forestry Chronicle*, volume 86, numéro 5, pp. 589-596.
- SCULL, Peter R. et Jana L. RICHARDSON. 2007. « A method to use ranked timber observations to perform forest composition reconstruction from land survey data ». *American Midland Naturalist*, volume 158, numéro 2, pp. 446-460.
- SOCIÉTÉ DE PROTECTION DES FORÊTS CONTRE LES INCESTES ET MALADIES (SOPFIM). 1992. « Programme quinquennal (1993-1997) de pulvérisation aérienne d'insecticides contre certains insectes forestiers. Tome 1 - tordeuse des bourgeons de l'épinette ». Étude d'impact sur l'environnement réalisé par Lavalin Environnement Inc. 839 p.
- SOCIÉTÉ DE PROTECTION DES FORÊTS CONTRE LES INCESTES ET MALADIES (SOPFIM). 2011. « Délimitation des secteurs forestiers admissibles aux pulvérisations aériennes d'insecticide biologique pour lutter contre la tordeuse des bourgeons de l'épinette ». Rapport d'avancement des travaux. 29 p.
- ST-CLAIR, Samuel B. et Jonathan P. LYNCH. 2005. « Differences in the success of sugar maple and red maple seedlings on acid soils are influenced by nutrient dynamics and light environment ». *Plant, Cell and Environment*, volume 28, numéro 7, pp. 874-885.
- TERRAIL, Raphaële. 2013. « Influence de la colonisation sur les transformations du paysage forestier depuis l'époque préindustrielle dans l'Est du Québec (Canada) ». Thèse de doctorat en biologie. Rimouski : Université du Québec à Rimouski. 115 p.
- TERRAIL, Raphaële, Dominique ARSENEAULT, Marie-Josée FORTIN, Sébastien DUPUIS et Yan BOUCHER. 2014. « An early forest inventory indicates high accuracy of forest composition data in pre-settlement land survey records ». *Journal of Vegetation Science*, volume 25, numéro 3, pp. 691-702.
- THOMPSON, Ian D., Julie H. SIMARD et Rodgers D. TITMAN. 2006. « Historical changes in white pine (*Pinus strobus* L.) density in Algonquin Park, Ontario, during the 19<sup>th</sup> century ». *Natural Areas Journal*, volume 26, numéro 1, pp. 61-71.
- THOMPSON, Jonathan R., Dunbar N. CARPENTER, Charles V. COGBILL et David R. FOSTER. 2013. « Four centuries of change in northeastern United States forests ». *PLoS One*, volume 8, numéro 9, pp. e72540.

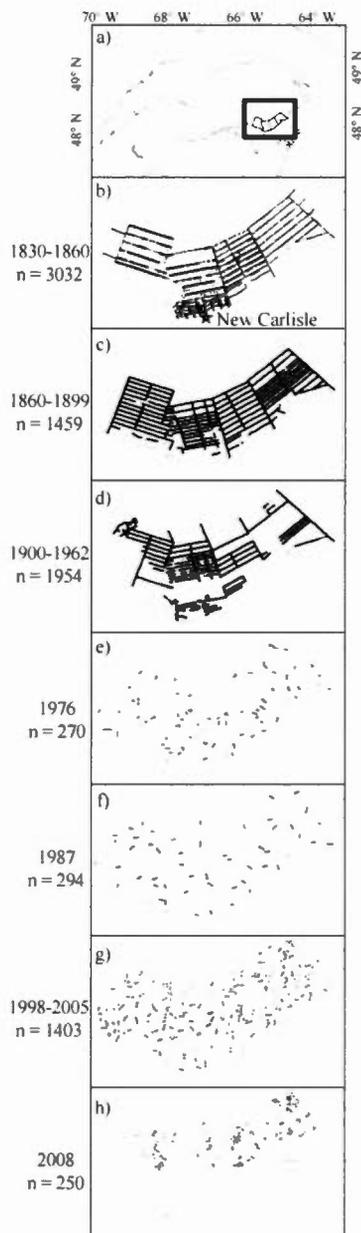
- VADEBONCOEUR, Matthew A., Steven P. HAMBURG, Charles V. COGBILL et Wendy Y. SUGIMURA. 2012. « A comparison of presettlement and modern forest composition along an elevation gradient in central New Hampshire ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 42, numéro 1, pp. 190-202.
- VINCENT, Arleigh B. 1962. « Development of balsam fir thickets in the green river watershed following the spruce budworm outbreak of 1913-1919 ». Gouvernement du Canada, Ottawa. 20 p.
- WEBB, Leland S. 1957. « The growth and development of balsam fir in Gaspé ». *Pulp and Paper Magazine of Canada*, Woodland Review Section, July, pp. 206-214.
- WEBB, Leland S. 1961. « Clear cutting of pulpwood in the balsam fir spruce forest of Gaspé ». *Pulp and Paper Magazine of Canada*, Woodland Review Section, September, pp. 236-248.
- WEIR, Jeff M. H. et Edward A. JOHNSON. 1998. « Effects of escaped settlement fires and logging on forest composition in the mixedwood boreal forest ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 28, numéro 3, pp. 459-467.
- WHITNEY, Gordon G. 1994. « From coastal wilderness to fruited plain: a history of environmental change in temperate North America, 1500 to the present ». Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Unis. 451 p.
- WILLIS, Gary L. et James A. JOHNSON. 1978. « Regeneration of yellow birch following selective cutting of old-growth northern hardwoods ». Michigan Technological University, Ford Forestry Center, L'Anse, Michigan. 24 p.
- YAGOUTI, Abderrahmane, Gilles BOULET et Luc VESCOVI. 2006. « Homogénéisation des séries de températures et analyse de la variabilité spatio-temporelle de ces séries au Québec méridional, rapport no. 4 ». Ouranos, Montréal, Québec. 138 p.
- YAGOUTI, Abderrahmane, Gilles BOULET, Lucie VINCENT, Luc VESCOVI et Eva MEKIS. 2008. « Observed changes in daily temperature and precipitation indices for southern Québec, 1960-2005 ». *Atmosphere-Ocean*, volume 46, numéro 2, pp. 243-256.

### III.1.7 Tableaux

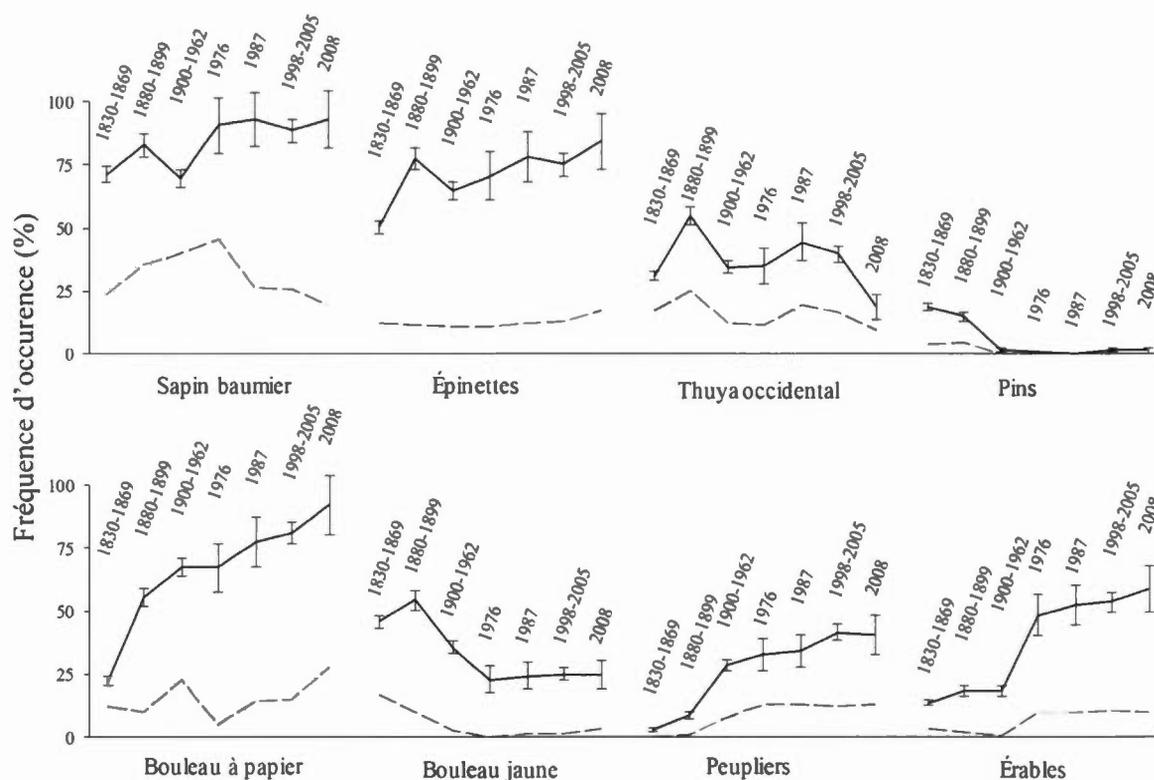
**Table 3-1.** Caractéristiques de paysage dans les secteurs incendiés (1890-1960) et non incendiés, décrites selon la fréquence de coupes totales et partielles, la densité de chemins, la défoliation observée lors de la dernière épidémie de TBE, la proportion de peuplements feuillus, mélangés et résineux ainsi que la fréquence d'occurrence des taxons dans les quatre jeux de placettes échantillons

	Secteur incendié	Secteur non incendié
Coupe totale	0,21 %	28,81 %
Coupe partielle	1,34 %	37,27 %
Densité de chemins (m/ha)	26,35	39,51
Indice de défoliation moyen	20,15	23,27
Peuplements feuillus	33,68 %	23,87 %
Peuplements mélangés	48,60 %	53,04 %
Peuplements résineux	17,72 %	23,09 %
Sapin baumier	87,70 %	91,78 %
Épinettes	84,13 %	73,21 %
Épinette blanche	74,21 %	61,63 %
Épinette noire	45,63 %	30,77 %
Épinette rouge	6,15 %	3,98 %
Thuya occidental	17,06 %	42,44 %
Pin blanc	0,99 %	0,88 %
Mélèze laricin	2,38 %	9,64 %
Bouleau à papier	87,30 %	76,92 %
Bouleau jaune	11,90 %	30,33 %
Peupliers	59,52 %	26,88 %
Peuplier baumier	3,57 %	7,60 %
Peuplier à grande dents	3,17 %	0,62 %
Peuplier faux-tremble	58,33 %	22,63 %
Érables	54,17 %	49,51 %
Érable à sucre	9,33 %	15,47 %
Érable rouge	50,79 %	43,41 %

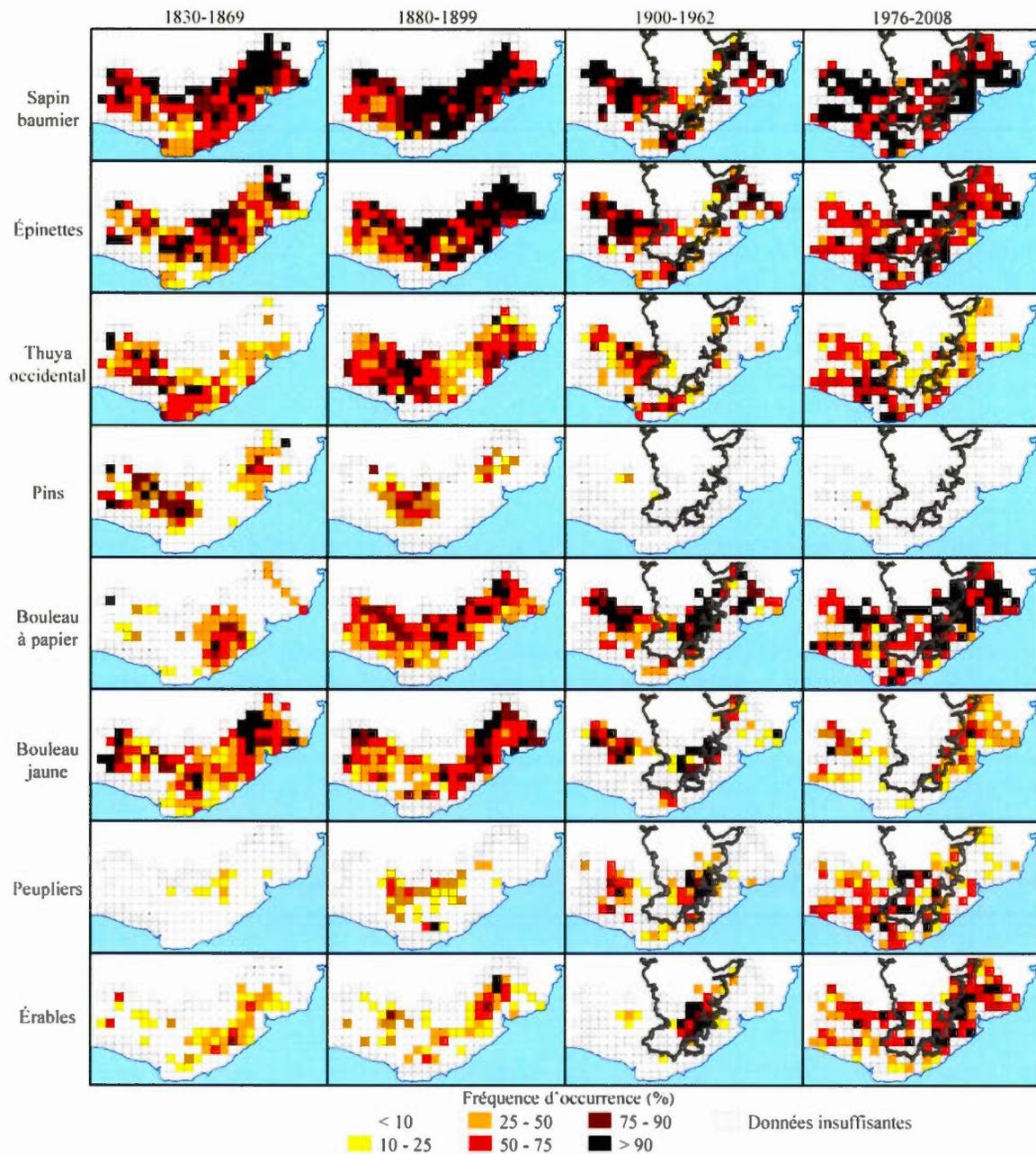
## III.1.8 Figures



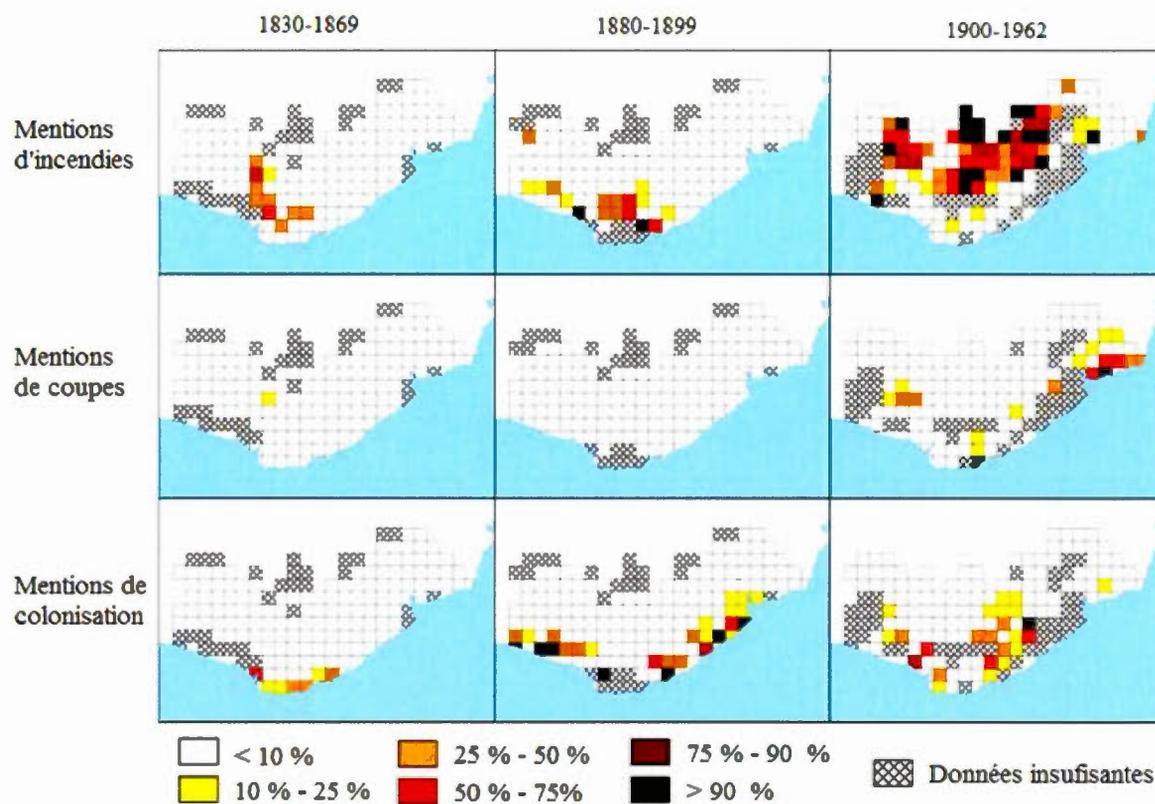
**Fig. 3-1.** Aire d'étude située au sud de la péninsule gaspésienne (a) et localisation des sept jeux de données utilisés dans les analyses (b à h). Pour les trois premiers jeux de données (b, c et d), chaque ligne représente une observation d'arpenteur. Pour les quatre derniers jeux de données (e, f, g et h), chaque point représente une placette d'inventaire forestier.



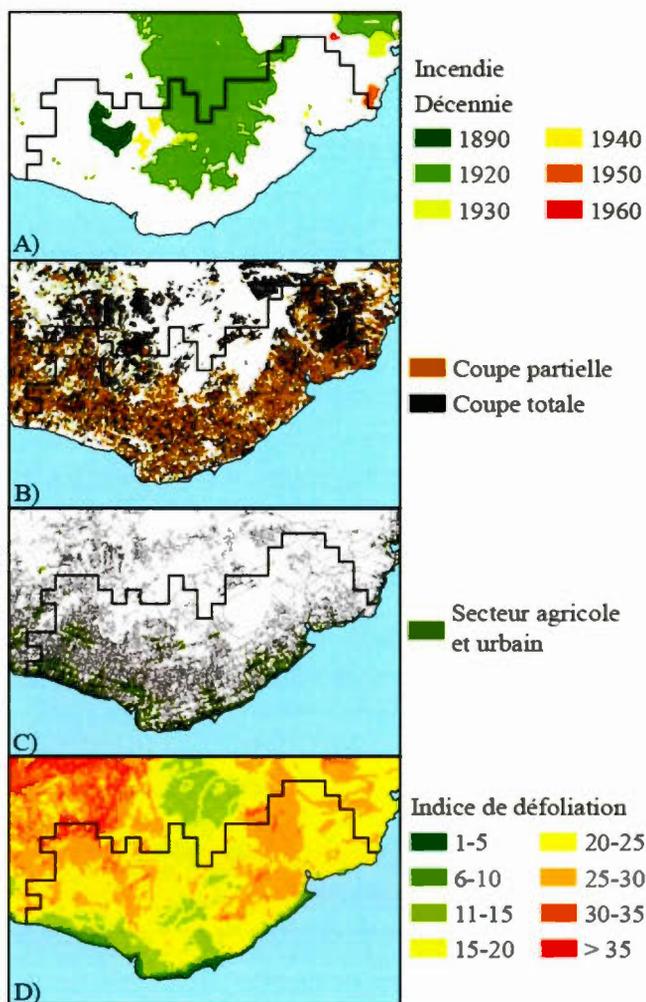
**Fig. 3-2.** Fréquence d'occurrence (ligne pleine) et fréquence au premier rang (ligne pointillée) des principaux taxons dans les sept jeux de données. Pour les fréquences d'occurrence, l'intervalle de confiance à 95 % est indiqué par les barres d'erreurs.



**Fig. 3-3.** Fréquence d'occurrence des principaux taxons dans les jeux de données, sur une grille de 186 cellules de 9 km<sup>2</sup>. Les trois premières colonnes montrent les fréquences dans les trois jeux de données d'archive d'arpentage. La quatrième colonne montre la fréquence dans les quatre jeux de données de placettes d'inventaire forestier combinés. La limite de l'incendie de 1924 est indiquée sur les cartes du XX<sup>e</sup> siècle.



**Fig. 3-4.** Distribution spatiale de la fréquence des mentions de perturbations dans les trois jeux de données des arpenteurs, dans une grille de 186 cellules de 9 km<sup>2</sup> (3 × 3 km).



**Fig. 3-5.** Perturbations récentes reconstituées. A) Incendies forestiers des décennies 1890 à 1960. B) Coupes totales et partielles des décennies 1960 à 2000. C) Secteurs agricoles et urbains ainsi que le réseau routier photo-interprété lors du dernier inventaire forestier (2004). D) Indice de défoliation de la dernière épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette (1972-1992), les valeurs plus élevées indiquent davantage de défoliation que des valeurs faibles. Le tracé noir superposé sur les cartes délimite la région d'étude.

## III.1.9 Annexe



**Fig. 3-S1.** Plan du canton Cox dessiné par MacDonald (1836) et agrandissement de la section nord-ouest du canton où un incendie forestier a été noté (*Burnt land*) ainsi que ses limites approximatives. Les limites de cet incendie sont confirmées et notées plus précisément dans le carnet d'arpentage.



## CONCLUSION GÉNÉRALE

Les données des archives d'arpentage ont été utilisées dans de nombreuses études pour reconstituer la composition forestière préindustrielle et sa transformation en Amérique du Nord. La majorité des études réalisées aux États-Unis ont utilisé des données d'arbres témoins (Bourdo 1956, Whitney 1994) alors que celles réalisées au Canada ont utilisé les données des descriptions linéaires (Gentilcore et Donkin 1973, Dupuis 2009). Conséquemment, comparer les résultats d'une étude à l'autre, qui utilisent des données différentes, peut être risqué. Dans le premier chapitre de cette thèse, les deux types de données ont été utilisés ensemble pour la première fois sur une même région, permettant de comprendre comment ces deux types de données peuvent se comparer. Nos résultats montrent que les abondances des taxons notés comme arbres témoins se comparent aux valeurs de dominance des descriptions linéaires. Ce constat pourra aider à combiner à des résultats de plusieurs régions et ainsi décrire la composition préindustrielle et sa transformation à très grande échelle spatiale. Il faut toutefois mentionner que dans la péninsule gaspésienne, un seul arbre témoin est noté à la fois, c'est-à-dire qu'en un endroit donné, un seul arbre témoin a été noté par l'arpenteur. Les arbres témoins notés aux États-Unis diffèrent en ce sens, puisque plusieurs arbres témoins ont été notés en un même endroit par l'arpenteur, généralement entre deux et cinq arbres témoins (Bourdo 1956, Whitney 1994). Ainsi, de telles données d'arbres témoins multiples pourraient nous renseigner sur la composition des forêts davantage qu'en décrivant simplement la dominance des peuplements.

La majorité des études de reconstitution de composition préindustrielle sont basées sur des travaux d'arpentage primitif réalisés sur les lignes cantonales. Les arpentages de rivières, même s'ils sont abondants dans certaines régions difficiles d'accès, ont été rarement utilisés et les données n'ont pas été comparées explicitement à celles des

arpentages de cantons (Aubé 2008). La représentativité de ces données n'avait donc jamais été démontrée. Les résultats du premier chapitre démontrent que ces données comportent des biais, notamment en décrivant surtout les peuplements en basses altitudes. À moins de chercher à décrire des peuplements spécifiquement riverains, ces données ne devaient pas être utilisées pour décrire la forêt préindustrielle d'une région.

La forêt préindustrielle reconstituée dans cette thèse correspond aux descriptions notées dans plusieurs documents historiques portant sur la région (Ells 1884, Low 1884, Langelier 1906, Rouillard 1914, Blanchard 1930, Guité Pitre 1940, Halliday et Brown 1943, Dansereau 1950, Köestler 1959, Lafond et Ladouceur 1968) et aux études précédemment réalisées dans la région (Lévesque 1997, Brunet 2002, Pinna *et al.* 2009a). La composition reconstituée est également cohérente par rapport aux reconstitutions réalisées dans les régions voisines (Etheridge *et al.* 2005, Boucher *et al.* 2006, 2009a, b, Dupuis 2009, Perrotte-Caron et Pinna 2012, Terrail 2013, Thompson *et al.* 2013). Cette étude permet donc d'améliorer nos connaissances sur la composition forestière préindustrielle de la région, en utilisant des données spatialement explicites qui couvrent l'entièreté du territoire. La distribution spatiale et altitudinale des taxons a ainsi pu être reconstituée pour la première fois dans la région. Nous avons observé que la limite altitudinale préindustrielle du thuya occidental et du bouleau jaune se situe à environ 560 m, celle des pins à environ 360 m et celle des érables à environ 520 m.

Certains des peuplements thermophiles mentionnés dans la littérature (Bouchette 1815, 1831, Drapeau 1863, Langelier 1884, 1905, 1906, Rouillard 1914, Service de renseignement sur les ressources naturelles 1926, Campagna 1939, Dansereau 1944) ont aussi été notés par les arpenteurs, quoique ces mentions sont plutôt rares. Par exemple, sur un total de 23 455 observations d'arpenteurs (descriptions linéaires et arbres témoins, arpentage de cantons et de rivières combinés), le frêne noir a été mentionné 87 fois, le hêtre à grandes feuilles six fois, l'orme d'Amérique 18 fois et la pruche du Canada une fois. Aucune observation d'arpenteurs ne fait mention du chêne rouge. Ce résultat suggère que

les peuplements thermophiles ont bien existé, mais qu'ils étaient rares et les documents historiques semblent surestimer leur abondance.

Nos résultats contribuent à améliorer la compréhension des causes des changements de composition. Dans cette étude, nous utilisons la particularité de la région où le climat est demeuré stable au XX<sup>e</sup> siècle et nous disposons de données historiques abondantes et précises. Ces particularités propres à la péninsule gaspésienne sont des atouts majeurs dans l'étude de l'impact des changements globaux. À notre connaissance, cette situation n'a été mise à profit dans aucune autre étude, probablement car cette particularité de climat stable a rarement été identifiée. Le fait que la limite altitudinale pour tous les taxons soit demeurée stable entre l'époque préindustrielle et moderne supporte notre interprétation de climat régionalement stable basé sur des données instrumentales. Les changements de composition reconstitués dans la région sont les mêmes que ceux documentés ailleurs en forêt tempérée et boréale de l'Amérique du Nord. Pour cette raison, nous croyons que nos conclusions peuvent être extrapolées aux autres forêts tempérées et boréales. Les changements de composition, dont l'augmentation des érables, peuvent donc survenir en absence de changements climatiques. Le rôle des perturbations anthropiques dans les changements de composition est ainsi mis en évidence par cette thèse.

Dans la péninsule gaspésienne, l'augmentation de l'activité des feux au cours du XX<sup>e</sup> siècle semble être le principal agent de changement global qui a transformé le paysage régional. Des incendies forestiers survenaient naturellement à l'époque préindustrielle. Certains ont été notés par des arpenteurs et certains documents historiques en font mention (Annett 1992). Cependant, la colonisation a provoqué une augmentation de l'activité des feux, mesurable avec les valeurs de cycles de feux calculés au second chapitre de la thèse. À l'époque préindustrielle, la valeur du cycle de feux se situait entre 199 à 2121 ans, dépendamment de la région, de l'époque ou de la persistance post-feux considérée. Même si cette évaluation paraît incertaine, elle démontre que le cycle de feux était très long. De plus en plus d'incendies ont été notés au XX<sup>e</sup>, raccourcissant la valeur du cycle de feux. Cette tendance a déjà été observée dans la région et dans les régions adjacentes (Cwynar

1977, Wein et Moore 1977, 1979, Le Groupe Dryade 1986, Dupuis 2009, Terrail 2013) et même à l'échelle globale (Bowman *et al.* 2011). Les changements de composition documentés sont, pour la plupart, corrélés aux feux du XX<sup>e</sup> siècle. Selon Terrail (2013), ces feux ont aussi eu une incidence majeure sur la structure du paysage au Bas-Saint-Laurent. Les résultats du troisième chapitre confirment cette tendance, en montrant que la composition, la dynamique et l'aménagement du paysage régional actuel est structuré par les feux historiques.

Selon les résultats du deuxième chapitre de la thèse, les coupes forestières ont causé relativement peu de changements de composition. Ce résultat contraste à ceux d'autres études menées en forêt tempérées (Mladenoff *et al.* 1993, Boucher *et al.* 2006, Laquerre *et al.* 2011) mais supportent en partie ceux d'études menées en forêt boréale, où les plus grands changements de composition surviennent après feux ou après une combinaison de coupe et de feux (Carleton et MacLellan. 1994, Fortin 2008, Bouchard et Pothier 2013; Boucher *et al.* 2017b). Cependant, il faut mentionner qu'en Gaspésie les coupes et les feux du XX<sup>e</sup> siècle sont deux variables partiellement colinéaires, spatialement séparées, c'est-à-dire que les coupes ont souvent été réalisées dans des peuplements non brûlés pour au moins 80 ans. Ainsi, mesurer l'impact des coupes correspond, en partie, à mesurer l'impact de l'absence de feux.

Peu d'études ont reconstitué le changement de composition en plusieurs époques pour une même région d'étude. Les circonstances particulières rencontrées dans le sud de la Gaspésie ont permis la réalisation du troisième chapitre de la thèse. Des tendances en matière de chronologie de changement de composition ont été confirmées ou découvertes. Par exemple, l'augmentation des peupliers est subitement arrivée au tournant du XX<sup>e</sup> siècle, après l'avènement des grands feux de colonisation. L'augmentation du bouleau à papier est en cours depuis le début de la colonisation et n'a jamais cessé. L'augmentation des érables est semblable être survenue subitement au cours de la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle.

Cette augmentation subite d'érable est encore mal comprise, tant dans la région d'étude que dans l'ensemble de son aire de distribution. Plusieurs facteurs ont été évoqués pour expliquer cette augmentation, comme la pratique de plus en plus fréquente des coupes partielles, les épidémies d'insectes récentes, la hausse de CO<sub>2</sub> atmosphérique ou encore le broutage par les cervidés. Une autre façon d'aborder la question pourrait être de tenter d'identifier ce qui limitait la progression des érables à l'époque préindustrielle. Présentement, les facteurs identifiés limitant la progression nordique de l'érable à sucre vers la forêt boréale sont les basses températures et la sécheresse estivale, qui sont néfastes au développement et à la survie des semis (Beekharry 2016). Puisque la température et les précipitations dans la péninsule gaspésienne sont demeurées stables au XX<sup>e</sup> siècle, en même temps que les érables ont augmenté en fréquence et en dominance, d'autres facteurs limitants doivent être impliqués. Il se pourrait, par exemple, que la transformation du sol soit en cause. À l'époque préindustrielle, les forêts étaient majoritairement composées de résineux. Ainsi, le sol était souvent couvert par une importante litière organique acide et pauvre en nutriment. Le taux de germination et la croissance des érables est plutôt faible sur de tels sols (Godman *et al.* 1990, Anseau *et al.* 1995, St-Clair et Lynch 2005). Les perturbations totales du XX<sup>e</sup> siècle (coupes ou feux) ont pu permettre de réduire l'épaisseur de la litière coniférienne tout en augmentant la proportion de feuillus intolérants dans les forêts, menant ainsi à une transformation du sol favorisant les érables. Une fois installés, les érables maintiennent une litière favorable à la germination et la survie de leur semis (Godman *et al.* 1990, Anseau *et al.* 1995).

Les pratiques d'aménagement forestier sont en évolution constante et la recherche en sciences forestières contribue à développer des pratiques d'aménagement forestier durable. Cette thèse contribue à ce développement de pratiques durables en documentant l'impact à long terme des perturbations anthropiques et, plus spécifiquement pour la région, en fournissant les informations nécessaires à l'élaboration de cibles d'aménagement écosystémique. Il est toutefois important de garder en perspective que les régimes forestiers et les pratiques d'aménagement ont grandement évolués depuis les dernières décennies et qu'ils continueront d'évoluer. Par exemple, les pratiques forestières du début du XX<sup>e</sup> siècle

n'avaient que peu de considération envers la foresterie durable et ont souvent mené à la surexploitation des forêts (Guay 1942). Il a fallu attendre l'an 1987 pour qu'une loi oblige l'exploitation forestière québécoise à respecter le principe de rendement soutenu. Au cours des dernières décennies, des normes de plus en plus sévères ont été mises en place, encadrant notamment la protection des sols, de la régénération, des cours d'eau, des milieux humides et des espèces sensibles (Drushka 2003). L'aménagement écosystémique présentement employé au Québec est une stratégie d'aménagement qui poursuit cette évolution des pratiques forestières vers des pratiques durables, mais ne représente probablement pas encore l'étape finale. Au cours des prochaines années, le milieu forestier devra continuer à faire face aux changements globaux et les pratiques devront s'adapter à un avenir comportant de plus en plus d'incertitudes (Messier *et al.* 2015).

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABRAMS, Marc D. et Charles M. RUFFNER. 1995. « Physiographic analysis of witness-tree distribution (1765-1798) and present forest cover through north central Pennsylvania ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 25, numéro 4, pp. 659-668.
- ABRAMS, Marc D. 1998. « The red maple paradox: What explains the widespread expansion of red maple in eastern forests? ». *BioScience*, volume 48, numéro 5, pp. 355-364.
- ALI, Adam A., Hugo ASSELIN, Alayn C. LAROUCHE, Yves BERGERON, Christopher CARCAILLET et Pierre J. H. RICHARD. 2008. « Changes in fire regime explain the Holocene rise and fall of *Abies balsamea* in the coniferous forests of western Québec, Canada ». *The Holocene*, volume 18, numéro 5, pp. 693-703.
- ANCHIKAIKIS, Kevin J., Rob WILSON, Keith R. BRIFFA, Uif BÜNTGEN, Edward R. COOK, Rosanne D'ARRIGO, Nicole DAVI, Jan ESPER, David FRANK et Björn GUNNARSON. « Last millennium Northern Hemisphere summer temperatures from tree rings: Part II, spatially resolved reconstructions ». *Quaternary Science Reviews*, volume 163, pp. 1-22.
- ANGERS, Virginie A. 2009. « L'enjeu écologique du bois mort - Complément au Guide pour la description des principaux enjeux écologiques dans les plans régionaux de développement intégré des ressources et du territoire ». Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de l'environnement et de la protection des forêts. Québec. 45 p.
- ANNETT, Ken H. 1992. « Forest fire of 1867 ». *Gaspé of Yesterday*, volume 7, numéro 249, pp. 157-165.
- ANSEAU, Colette. 1995. « L'érable à sucre : Caractéristiques, écologie et aménagement ». Ministère des Ressources naturelles, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. Québec. 394 p.

- ARCHAMBAULT, Louis, Claude DELISLE, Guy R. LAROCQUE, Luc SIROIS et Pierre BELLEAU. 2006. « Fifty years of forest dynamics following diameter-limit cuttings in balsam fir - yellow birch stands of the Lower St. Lawrence region, Quebec ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 36, numéro 11, pp. 2745-2755.
- ASNONG, Hans et Pierre J. H. RICHARD. 2003. « La végétation et le climat postglaciaires du centre et de l'est de la Gaspésie, au Québec ». *Géographie Physique et Quaternaire*, volume 57, numéro 1, pp. 37-63.
- ASSEMBLÉE LÉGISLATIVE. 1869. « Rapport du Comité spécial auquel ont été renvoyés la correspondance et les documents relatifs aux incendies qui ont eu lieu sur la côte du golfe St. Laurent, dans le district de Gaspé en 1867 & 1868, avec tout ce qui se rapporte aux incendies qui peuvent avoir eu lieu dans les forêts d'aucune partie du pays, et aussi de toutes les questions qui se rapportent au déboisement et au reboisement ». Presses à vapeur de La Minerve. La Minerve, Montréal, Québec.
- AUBÉ, Mélanie. 2008. « The pre-European settlement forest composition of the Miramichi River watershed, New Brunswick, as reconstructed using witness trees from original land surveys ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 38, numéro 5, pp. 1159-1183.
- BAKER, Frederick S. 1918. « Aspen as a temporary forest type ». *Journal of Forestry*, volume 16, numéro 3, pp. 294-300.
- BALCH, Robert E. 1942a. « Estimation of forest insect damage with particular reference to *Dendroctonus piceaperda* (Hopk.) ». *Pulp and Paper Magazine of Canada*, Woodland Review Section, November, pp. 900-906.
- BALCH, Robert E. 1942b. « The spruce sawfly outbreak in 1941 ». *Pulp and Paper Magazine of Canada*, Woodland Review Section, April, pp. 385-388.
- BARRETTE, Martin, Louis BÉLANGER et Louis DE GRANPRÉ. 2010. « Preindustrial reconstruction of a perhumid midboreal landscape, Anticosti Island, Quebec ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 40, numéro 5, pp. 928-942.
- BEAUDET, Marilou et Christian MESSIER. 1997. « Le bouleau jaune en peuplements feuillus et mixtes : autoécologie, dynamique forestière et pratiques sylvicoles ». Revue de littérature préparée pour la Forêt Modèle du Bas-Saint-Laurent. Groupe de Recherche en Écologie Forestière (GREF), Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec. 56 p.

- BECKAGE, Brian, Ben OSBORNE, Daniel G. GAVIN, Carolyn PUCKO, Thomas G. SICCAMMA et Timothy PERKINS. 2008. « A rapid upward shift of a forest ecotone during 40 years of warming in the Green Mountains of Vermont ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, volume 105, numéro 11, pp. 4197-4202.
- BEEKHARRY, Arvin. 2016. « Germination et croissance de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) au nord de la limite nordique de son aire de répartition dans l'ouest du Québec, Canada ». Mémoire de maîtrise en biologie. Rouyn-Noranda : Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. 72 p.
- BERGERON, Yves. 2000. « Species and stand dynamics in the mixed woods of Quebec's southern boreal forest ». *Ecology*, volume 81, numéro 6, pp. 1500-1516.
- BERGERON, Yves et Danielle CHARRON. 1994. « Postfire stand dynamics in a southern boreal forest (Québec): a dendroecological approach ». *Écoscience*, volume 1, numéro 2, pp. 173-184.
- BERGERON, Yves et Alain LEDUC. 1998. « Relationships between change in fire frequency and mortality due to spruce budworm outbreak in the southeastern Canadian boreal forest ». *Journal of Vegetation Science*, volume 9, numéro 4, pp. 492-500.
- BESCHTA, Robert L., Luke E. PAINTER, Tall LEVI et William J. RIPPLE. 2016. « Long-term aspen dynamics, trophic cascades, and climate in northern Yellowstone National Park ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 46, numéro 4, pp. 548-556.
- BJORKMAN, Anne D. et Mark VELLEND. 2010. « Defining historical baselines for conservation: ecological changes since european settlement on Vancouver Island ». *Conservation Biology*, volume 24, numéro 6, pp. 1559-1568.
- BLAIS, Jean R. 1961. « Spruce budworm outbreaks in the Lower St. Lawrence and Gaspé regions ». *The Forestry Chronicle*, volume 37, numéro 3, pp. 192-202.
- BLAIS, Jean R. 1983. « Trends in the frequency, extent and severity of spruce budworm outbreaks in Eastern Canada ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 13, numéro 4, pp. 539-547.
- BLANCHARD, Raoul. 1930. « Études canadiennes : I. La presqu'île de Gaspé ». *Revue de Géographie Alpine*, volume 18, numéro 1, pp. 5-112.

- BLANCHARD, Raoul. 1935. « L'est du Canada français, "Province de Québec" ». Publications de l'Institut scientifique franco-canadien. Masson et Librairie Beauchemin. Paris et Montréal, France et Canada. 366 p.
- BLANCHET, Patrick. 2003. « Feux de forêt : l'histoire d'une guerre ». Trait d'union, Montréal, Québec. 183 p.
- BOISVERT-MARSH, Laura, Catherine PÉRIÉ et Sylvie DE BLOIS. 2014. « Shifting with climate? Evidence for recent changes in tree species distribution at high latitudes ». *Ecosphere*, volume 5, numéro 7, pp. 1-33.
- BOUCHARD, André R. 2005. « Lignes directrices pour la gestion des territoires classés écosystèmes forestiers exceptionnels ». Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de l'environnement forestier. Québec. 24 p.
- BOUCHARD, André R. et Gérald DOMON. 1997. « The transformation of the natural landscape of the Haut-Saint-Laurent (Québec) and their implications on future resource management ». *Landscape and Urban Planning*, volume 37, numéro 1-2, pp. 99-107.
- BOUCHARD, Mathieu, Daniel D. KNEESHAW et Yves BERGERON. 2005. « Mortality and stand renewal patterns following the last spruce budworm outbreak in mixed forests of western Quebec ». *Forest Ecology and Management*, volume 204, numéro 2-3, pp. 297-313.
- BOUCHARD, Mathieu et David POTHIER. 2011. « Long-term influence of fire and harvesting on boreal forest age structure and forest composition in eastern Québec ». *Forest Ecology and Management*, volume 261, numéro 4, pp. 811-820.
- BOUCHER, Yan, Dominique ARSENEAULT et Luc SIROIS. 2006. « Logging-induced change (1930-2002) of a preindustrial landscape at the northern range limit of northern hardwoods, eastern Canada ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 36, numéro 2, pp. 505-517.
- BOUCHER, Yan, Dominique ARSENEAULT et Luc SIROIS. 2009a. « Logging history (1820-2000) of a heavily exploited southern boreal forest landscape: Insights from sunken logs and forestry maps ». *Forest Ecology and Management*, volume 258, numéro 7, pp. 1359-1368.

- BOUCHER, Yan, Dominique ARSENEAULT, Luc SIROIS et Louis BLAIS. 2009b. « Logging pattern and landscape changes over the last century at the boreal and deciduous forest transition in Eastern Canada ». *Landscape Ecology*, volume 24, numéro 2, pp. 171-184.
- BOUCHER, Yan, Martin-Hugues SAINT-LAURENT et Pierre GRONDIN. 2011. « Logging-induced edge and configuration of old-growth forest remnants in the eastern North American boreal forests ». *Natural Areas Journal*, volume 31, numéro 3, pp. 300-306.
- BOUCHER, Yan, Mathieu BOUCHARD, Pierre GRONDIN et Patrice TARDIF. 2011. « Le registre des états de référence : intégration des connaissances sur la structure, la composition et la dynamique des paysages forestiers naturels du Québec méridional ». Gouvernement du Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. Direction de la recherche forestière. 21 p.
- BOUCHER, Yan et Pierre GRONDIN. 2012. « Impact of logging and natural stand-replacing disturbances on high-elevation boreal landscape dynamics (1950-2005) in eastern Canada ». *Forest Ecology and Management*, volume 263, numéro 1, pp. 229-239.
- BOUCHER, Yan, Pierre GRONDIN et Isabelle AUGER. 2014. « Land use history (1840-2005) and physiography as determinants of southern boreal forests ». *Landscape Ecology*, volume 29, numéro 3, pp. 437-450.
- BOUCHER, Yan, Maude PERRAULT-HÉBERT, Richard FOURNIER, Pierre DRAPEAU et Isabelle AUGER. 2017a. « Cumulative patterns of logging and fire (1940-2009): consequences on the structure of the eastern Canadian boreal forest ». *Landscape Ecology*, volume 32, numéro 2, pp. 361-375.
- BOUCHER, Yan, Isabelle AUGER, Jean NOËL, Pierre GRONDIN et Dominique ARSENEAULT. 2017b. « Fire is a stronger driver of forest composition than logging in the boreal forest of eastern Canada ». *Journal of Vegetation Science*, volume 28, numéro 1, pp. 57-68.
- BOUCHETTE, Joseph. 1815. « Le district de Gaspé - 1815 ». *Revue d'Histoire de la Gaspésie*, volume 6, numéro 2-3, pp. 69-76.
- BOUCHETTE, Joseph. 1831. « Topographical dictionary of the province of Lower Canada ». Henry Colburn and Richard Bentley, Londres, Royaume-Unis.

- BOUDREAU, Claude et Michel GAUDREAU. 2007. « Le Québec sous l'oeil de l'arpenteur-géomètre depuis Champlain ». Les Publications du Québec. Québec 140 p.
- BOULANGER, Yan et Dominique ARSENEAULT. 2004. « Spruce budworm outbreaks in eastern Quebec over the last 450 years ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 34, numéro 5, pp. 1035-1043.
- BOULANGER, Yan, Dominique ARSENEAULT, Hubert MORIN, Yves JARDON, Philip BERTRAND et Charles DAGNEAU. 2012. « Dendrochronological reconstruction of spruce budworm (*Choristoneura fumiferana*) outbreaks in southern Quebec for the last 400 years ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 42, numéro 7, pp. 1264-1276.
- BOULANGER, Yan, Sylvie GAUTHIER, David R. GRAY, Héloïse LE GOFF, Patrick LEFORT et Jacques MORISSETTE. 2013. « Fire regime zonation under current and future climate over eastern Canada ». *Ecological Applications*, volume 23, numéro 4, pp. 904-923.
- BOULANGER, Yan, Sylvie GAUTHIER et Philip J. BURTON. 2014. « A refinement of models projecting future Canadian fire regimes using homogeneous fire regime zones ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 44, numéro 4, pp. 365-376.
- BOULANGER, Yan, Anthony R. TAYLOR, David T. PRICE, Dominic CYR, Elizabeth MCGARRIGLE, Werner RAMMER, Guillaume SAINTE-MARIE, André BEAUDOIN, Luc GUINDON et Nicolas MANSUY. 2016. « Climate change impacts on forest landscapes along the Canadian southern boreal forest transition zone ». *Landscape Ecology*, DOI : 10.1007/s10980-016-0421-7.
- BOURDO, Eric A. 1956. « A review of the general land office survey and of its use in quantitative studies of former forests ». *Ecology*, volume 37, numéro 4, pp. 754-768.
- BOWMAN, David M. J. S., Jennifer BALCH, Paulo ARTAXO, William J. BOND, Mark A. COCHRANE, Carla M. D'ANTONIO, Ruth DEFRIER, Fay H. JOHNSTON, Jon E. KEELY, Meg A. KRAWCHUK, Christian A. KULL, Michelle MACK, Max A. MORITZ, Stephen PYNE, Christopher I. ROOS, Andrew C. SCOTT, Navjot S. SODHI et Thomas W. SWETNAM. 2011. « The human dimension of fire regimes on Earth ». *Journal of Biogeography*, volume 38, numéro 12, pp. 2223-2236.

- BRISSON, Jacques, Yves BERGERON et André BOUCHARD. 1988. « Les successions secondaires sur sites mésiques dans le haut Saint-Laurent ». *Canadian Journal of Botany*, volume 66, numéro 6, pp. 1192-1203.
- BRISSON, Jacques et André BOUCHARD. 2003. « In the past two centuries, human activities have caused major changes in the tree species composition of southern Québec, Canada ». *Écoscience*, volume 10, numéro 2, pp. 236-246.
- BROWN, Dwayne, Michael CABBAGE, Leslie MCCARTHY et Karen NORTON. 2016. « NASA, NOAA analyses reveal record-shattering global warm temperatures in 2015 ». NASA press release, 16-008.
- BRUNET, Geneviève. 2002. « Reconstitution historique de la sapinière à bouleau blanc vierge de la Côte-de-Gaspé ». Mémoire de maîtrise en foresterie, Québec : Université Laval. 116 p.
- BUREAU D'AMÉNAGEMENT DE L'EST DU QUÉBEC (BAEQ). 1966. « Atlas régional du Bas-St-Laurent, de la Gaspésie et des Îles-de-la-Madeleine ». Mont-Joli, Québec. 136 p.
- CAMPAGNA, Elzéar. 1939. « Le *Quercus borealis* Michx. en Gaspésie ». *Annales de l'ACFAS*, Volume 5, pp. 104.
- CARLETON, Terence J. et Patricia MACLELLAN. 1994. « Woody vegetation responses to fire versus clear-cutting logging: A comparative survey in the central Canadian boreal forest ». *Écoscience*, volume 1, numéro 2, pp. 141-152.
- CLARK, David B. 1996. « Abolishing virginity ». *Journal of Tropical Ecology*, volume 12, numéro 5, pp. 735-739.
- CLARK, Stephen R. L. 2001. « From biosphere to technosphere ». *Journal of Scottish Philosophy*, volume 5, numéro 2, pp. 1-12
- CLARKE, John et Greg F. FINNEGAN. 1984. « Colonial survey records and the vegetation of Essex County, Ontario ». *Journal of Historical Geography*, volume 10, numéro 2, pp. 119-138.
- COMMISSION D'ÉTUDE SUR LA GESTION DE LA FORÊT PUBLIQUE QUÉBÉCOISE. 2004. « Rapport final ». Bibliothèque nationale du Québec, Québec.

- COGBILL, Charles V., John BURK et Glenn MOTZKIN. 2002. « The forests of presettlement New England, USA: spatial and compositional patterns based on town proprietor surveys ». *Journal of Biogeography*, volume 29, numéro 10-11, pp. 1279-1304.
- CROOK Gregory W., Paul E. VÉZINA et Yvan HARDY. 1979. « Susceptibility of balsam fir to spruce budworm defoliation as affected by thinning ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 9, numéro 3, pp. 428-435.
- CROSSLAND, Donna R. 2006. « Defining a forest reference condition for Kouchibouguac National Park and adjacent landscape in eastern New-Brunswick using four reconstructive approaches ». Mémoire de maîtrise en foresterie, Frédéricton : University of New-Brunswick. 304 p.
- CRUMLEY, Carole L. 1994. « Historical ecology: cultural knowledge and changing landscapes ». School of American Research Press, Santa-Fe, Nouveau-Mexique. 284 p.
- CRUTZEN, Paul J. 2000. « The “Anthropocene” ». *Global Change Newsletter*, volume 41, pp. 17-18
- CRUTZEN, Paul J. et Will STEFFEN. 2003. « How long have we been in the Anthropocene era? ». *Climatic Change*, volume 61, numéro 3, pp. 251-257.
- CUMMING, Steven G., Fiona K. A. SCHMIEGELOW et Philip J. BURTON. 2000 « Gap dynamics in boreal aspen stands: Is the forest older than we think? » *Ecological Applications*, volume 10, numéro 3, pp. 744-759.
- CWYNAR, Les C. 1976. « The recent fire history of Barron Township, Algonquin Park ». *Canadian Journal of Botany*, volume 55, numéro 11, pp. 1524-1538.
- CYR, Dominique, Sylvie GAUTHIER, Yves BERGERON et Christopher CARCAILLET. 2009. « Forest management is driving the eastern North American boreal forest outside its natural range of variability ». *Frontiers in Ecology and Environment*, volume 7, numéro 10, pp. 519-524.
- DALLAIRE, Sophie. 2004. « Bases écologiques pour l'aménagement de l'habitat hivernal du caribou de la Gaspésie : le cas d'une sapinière boréale inéquienne ». Mémoire de maîtrise en foresterie. Québec : Université Laval. 112 p.
- D'AMOURS, Catherine. 2009. « Établissement et évolution des populations gaspésiennes au XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles ». Mémoire de maîtrise en sciences géographiques. Québec : Université Laval. 142 p.

- DANNEYROLLES, Victor. 2016. « Reconstitution de la composition des forêts préindustrielles du Témiscamingue (Québec) à partir des archives de l'arpentage primitif ». Thèse de doctorat en biologie. Rouyn-Noranda : Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. 114 p.
- DANNEYROLLES, Victor, Dominique ARSENEAULT et Yves BERGERON. 2016a. « Pre-industrial landscape composition patterns and post-industrial changes at the temperate-boreal forest interface in western Quebec, Canada ». *Journal of Vegetation Science*, volume 27, numéro 3, pp. 470-481.
- DANNEYROLLES, Victor, Dominique ARSENEAULT et Yves BERGERON. 2016b. « Long-term compositional changes following partial disturbance revealed by the resurvey of logging concession limits in the northern temperate forest of eastern Canada ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 46, numéro 7, pp. 943-949.
- DANSEREAU, Pierre. 1944. « Interpenetrating climaxes in Quebec ». *Science*, volume 99, numéro 2578, pp. 426-427.
- DANSEREAU, Pierre. 1950. « Flora and vegetation of the Gaspé peninsula ». *Wild Flower*, volume 26, numéro 2, pp. 26-40.
- DANSEREAU, Marie-Claude. 1999. « Mortalité des arbres dans les sapinières matures du parc de la Gaspésie, Québec ». Mémoire de maîtrise en sciences biologiques. Montréal : Université du Québec à Montréal. 86 p.
- DE RÖMER, André H., Daniel D. KNEESHAW et Yves BERGERON. 2007. « Small gap dynamics in the southern boreal forest of eastern Canada: Do canopy gaps influence stand development? ». *Journal of Vegetation Science*, volume 18, numéro 6, pp. 815-826.
- DEBYLE, Norbert V. et Robert P. WINOKUR. 1985. « Aspen: ecology and management in the western United States ». USDA Forest Service, Rocky mountain forest and range experiment station, Fort Collins, Colorado. 283 p.
- DESJARDINS, Marc, Yves FRENETTE, Jules BÉLANGER et Bernard HÉTU. 1999. « Histoire de la Gaspésie, deuxième édition ». Institut Québécois de Recherche sur la Culture, Québec. 795 p.
- DUCHESNE, Louis et Rock OUIMET. 2008. « Population dynamics of tree species in southern Quebec, Canada: 1970-2005 ». *Forest Ecology and Management*, volume 255, numéro 7, pp. 3001-3012.

- DRAPEAU, Stanislas. 1863. « Étude sur les développements de la colonisation du Bas-Canada (1851-1861) ». Léger Brousseau, Québec, Québec. 593 p.
- DRUSHKA, Ken. 2003. « Canada's forest, a history ». McGill-Queen's University Press. Montréal, Québec. 97 p.
- DUPUIS, Sébastien. 2009 « Reconstitution de la composition des forêts préindustrielle du sud-est du Québec à partir des archives d'arpentage (1846-1949) ». Mémoire de maîtrise en gestion de la faune et de ses habitats. Rimouski : Université du Québec à Rimouski. 86 p.
- DUPUIS, Sébastien, Dominique ARSENEAULT et Luc SIROIS. 2011. « Change from pre-settlement to present-day forest composition reconstructed from early land survey records in eastern Québec, Canada ». *Journal of Vegetation Science*, volume 22, numéro 3, pp. 564-575.
- EGAN, Dave, Evelyn A. HOWELL et INTERNATIONAL SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION. 2005. « The historical ecology handbook: a restorationist's guide to reference ecosystems ». Island Press, Washington, États-Unis. 457 p.
- EISENBERG, Cristina, Trent S. SEAGER et David E. HIBBS. « Wolf, elk, and aspen food web relationships: Context and complexity ». *Forest Ecology and Management*, volume 299, pp. 70-80.
- ELLIOT Barbara et Beverly SHIELDS. 1994. « The application of geographic information systems for the interpretation of historical land survey ». Eastern Ontario Model Forest. Kemptville, Ontario. 81 p.
- ELLIS, Erle C., Kees K. GOLDEWIJK, Stefan SIEBERT, Deborah LIGHTMAN et Navin RAMANKUTTY. 2010. « Anthropogenic transformation of the biomes, 1700-2000 ». *Global Ecology and Biogeography*, volume 19, numéro 5, pp. 589-606.
- ELLS, Robert W. 1884. « Report on exploration and surveys in the interior of the Gaspé Peninsula ». Commission géologique du Canada, Dawson Brothers, Montréal, Québec. 34 p.
- ENVIRONNEMENT CANADA. 2017. « Normales climatiques au Canada 1971-2000 ». Services météorologiques du Canada. En ligne. [http://www.msc.ec.gc.ca/climate/climate\\_normals](http://www.msc.ec.gc.ca/climate/climate_normals). Consulté le 16 janvier 2017.
- ESRI. 2010. « ArcGIS 10 ». Redlands, Californie.

- ETHERIDGE, David A., Davis A. MACLEAN, Robert G. WAGNER et Jeremy S. WILSON. 2005. « Changes in landscape composition and stand structure from 1945-2002 on an industrial forest in New-Brunswick, Canada ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 35, numéro 8, pp. 1965-1977.
- FEI, Songlin et Kim C. STEINER. 2007. « Evidence for increasing red maple abundance in the Eastern United States ». *Forest Science*, volume 53, numéro 4, pp. 473-477.
- FEI, Songlin et Kim C. STEINER. 2009. « Rapid capture of growing space by red maple ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 36, numéro 8, pp. 1444-1452.
- FETHEROLF, James M. 1917. « Aspen as a permanent forest type ». *Journal of Forestry*, volume 15, numéro 6, pp. 757-760.
- FISICHELLI, Nicolas A., Lee E. FRELICH et Peter B. REICH. 2014. « Temperate tree expansion into adjacent boreal forest patches facilitated by warmer temperatures ». *Ecography*, volume 37, numéro 2, pp. 152-161.
- FLEMING, Richard A. et W. Jan A. VOLNEY. 1995. « Effects of climate change on insect defoliator population processes in Canada's boreal forest: Some plausible scenarios ». *Water, Air, and Soil Pollution*, volume 82, numéro 1, pp. 445-454.
- FOREMAN, Dave et Howie WOLKE. 1992. « The big outside: a descriptive inventory of the big wilderness areas of the United States ». Harmony books, New-York. 499 p.
- FORGET, Éric, Charles R. DREVER et François LORENZETTI. 2003. « Changements climatiques : impacts sur les forêts québécoises - revue de littérature ». Institut Québécois d'Aménagement de la Forêt Feuillue. Ripon, Québec. 57 p.
- FORTIN, Sylvain. 1999. « Expansion du tremble (*Populus tremuloides* Michx.) au cours du XX<sup>ième</sup> siècle, dans le bassin de la rivière York en Gaspésie, Québec ». Mémoire de maîtrise en ressources renouvelables. Chicoutimi : Université du Québec à Chicoutimi. 67 p.
- FORTIN, Sylvain. 2008. « Expansion postcoloniale du tremble (*Populus tremuloides*) dans le bassin de la rivière York, en Gaspésie ». Thèse de doctorat en science de l'environnement. Chicoutimi : Université du Québec à Chicoutimi. 103 p.

- FOSTER, David R. et John D. ABER. 2004. « Forests in time: the environmental consequences of 1,000 years of change in New England ». Yale University Press, New Haven, Connecticut. 477 p.
- FOSTER, David R., Glenn MOTZKIN et Benjamin SLATER. 1998. « Land-use history as long-term broad-scale disturbance: Regional forest dynamics in central New England ». *Ecosystems*, volume 1, numéro 1, pp. 96-119.
- FOSTER, Jeffrey R. et William A. REINERS. 1983. « Vegetation patterns in a virgin subalpine forest at Crawford Notch, White Mountains, New Hampshire ». *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, volume 110, numéro 2, pp. 141-153.
- FRELICH, Lee E. 2002. « Forest Dynamics and Disturbance Regimes. Studies from Temperate Evergreen-Deciduous Forests ». Cambridge Studies in Ecology. Cambridge University Press, New-York. 280 p.
- FRIEDMAN, Steven K. et Peter B. REICH. 2005. « Regional legacies of logging: departure from presettlement forest conditions in northern Minnesota ». *Ecological Applications*, volume 15, numéro 2, pp. 726-744.
- FRITSCHLE, Joy A. 2009. « Pre-EuroAmerican settlement forests in Redwood National Park, California, USA: a reconstruction using line summaries in historic land surveys ». *Landscape Ecology*, volume 24, numéro 6, pp. 833-847.
- FRITSCHLE, Joy A. 2012. « Identification of old-growth forest reference ecosystems using historic land surveys, Redwood National Park, California ». *Restoration Ecology*, volume 20, numéro 6, pp. 679-687.
- FUCHS, Richard, Martin HEROLD, Peter H. VERBURG, Jan G. P. CLEVERS et Jonas EBERLE. 2015. « Gross changes in reconstructions of historic land cover/ use for Europe between 1900 and 2010 ». *Global Change Biology*, volume 21, numéro 1, pp. 299-313.
- FURYAEV, Valentin V., Ross W. WEIN et David A. MACLEAN. 1983. « Fire influences in *Abies*-dominated forests ». Dans *The role of fire in northern circumpolar ecosystems*, sous la dir. de Ross W. Wein et David A. MacLean, pp. 222-234. Chichester, Royaume-Unis : John Wiley & Sons Ltd.
- GAGNON, J. Daniel. 1973. « Le grand brûlé de 1938-41 de la rivière York : son histoire, son évolution naturelle et sa restauration forestière ». Centre de Recherches Forestières des Laurentides, Ministère de l'Environnement, Service Canadien des Forêts, Sainte-Foy, Québec, 57 p.

- GAUTHIER, Sylvie, Alain LEDUC, Brian HARVEY, Yves BERGERON et Pierre DRAPEAU. 2001. « Les perturbations naturelles et la diversité écosystémique ». *Le Naturaliste Canadien*, volume 125, numéro 3, pp. 10-17.
- GAUTHIER, Sylvie, Marie-Andrée. VAILLANCOURT, Alain LEDUC, Louis DE GRANDPRÉ, Daniel D. KNEESHAW, Hubert MORIN, Pierre DRAPEAU et Yves BERGERON. 2008 « Aménagement écosystémique en forêt boréale ». Presses de l'Université du Québec. Québec. 600 p.
- GAUTHIER, Louis et Hironnelle VARADY-SZABO. 2014. « Opportunités et perspectives d'avenir de l'éclaircie précommerciale en Gaspésie ». Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Gaspé, Québec. 99 p.
- GENNARETTI Fabio, David HUARD, Maud NAULIER, Martine SAVARD, Christian BÉGIN, Dominique ARSENEAULT et Joël GUIOT (2017) « Bayesian multiproxy temperature reconstruction with black spruce ring widths and stable isotopes from the northern Quebec taiga ». *Climate Dynamics*. DOI : 10.1007/s00382-017-3565-5.
- GENTILCORE Louis R. et Kate DONKIN. 1973. « Land Surveys of Southern Ontario. An introduction and index to the field notebooks of the Ontario land surveyors ». York University. Toronto, Canada. 116 p.
- GIMMI, Urs, Thomas WOHLGEMUTH, Andreas RIGLING, Christian W. HOFFMANN et Matthias BÜRGI. 2010. « Land-use and climate change effects in forest compositional trajectories in a dry Central-Alpine valley ». *Annals of Forest Science* volume 67, numéro 7, pp. 701-709.
- GOBEIL, Antoine R. 1938. « Dommages causés aux forêts de la Gaspésie par les insectes ». Ministère des Terres et Forêts, Gouvernement du Québec, Québec. 41 p.
- GODMAN, Richard M., Harry W. YAWNEY et Carl H. TUBBS. 1990. « *Acer saccharum* Marsh. Sugar maple ». Dans *Silvics of North America. Vol. 2, Hardwoods*, sous la dir. De Russell M. Burns et Barbara H. Honkala, pp. 78-91. USDA, Washington, DC.
- GOLDBLUM, David et Lesley S. RIGG. 2007. « Age structure and regeneration dynamics of sugar maple at the deciduous/boreal forest ecotone, Ontario, Canada ». *Physical Geography*, volume 23, numéro 2, pp. 115-129.
- GOLDBLUM, David et Lesley S. RIGG. 2010. « The deciduous forest – boreal forest ecotone ». *Geography Compass*, volume 4, numéro 7, pp. 701-707.

- GRAHAM, Samuel A. 1963. « Aspens: phoenix trees of the Great Lakes region ». University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan. 272 p.
- GRANDTNER, Miroslav M. 1972. « Aperçu de la végétation du Bas Saint-Laurent, de la Gaspésie et des Îles-de-la-Madeleine ». *Cahiers de Géographie de Québec*, volume 16, numéro 37, pp. 116-121.
- GRONDIN, Pierre, Jacques BLOUIN et Philippe RACINE. 1999. « Rapport de classification écologique du sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune de l'est ». Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Direction des inventaires forestiers, Québec. 198 p.
- GRONDIN, Pierre, Jacques BLOUIN, Philippe RACINE, Hélène D'AVIGNON et Sylvie TREMBLAY. 2000. « Rapport de classification écologique du sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'est ». Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Direction des inventaires forestiers, Québec. 261 p.
- GRONDIN, Pierre, Jean NOËL et Denis HOTTE. 2003a. « Envahissement des parterres de coupe par le sapin en forêt boréale ». Dans *Les enjeux de biodiversité relatifs à la composition forestière*, sous la dir. de Pierre Grondin et Agathe Cimon, pp. 15-44. Ministère des Ressources Naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière et Direction de l'environnement forestier, Québec.
- GRONDIN, Pierre, Louis BÉLANGER, Vincent ROY, Jean NOËL et Denis HOTTE. 2003b. « Envahissement des parterres de coupe par les feuillus de lumière (enfeuillage) ». Dans *Les enjeux de biodiversité relatifs à la composition forestière*, sous la dir. de Pierre Grondin et Agathe Cimon, pp. 131-174. Ministère des Ressources Naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière et Direction de l'environnement forestier, Québec.
- GUAY, J. Édouard. 1942. « Inventaire des ressources naturelles du comté municipal de Rimouski, section forestière ». Ministère de l'Industrie et du Commerce et Ministère des Terres et Forêts, de la Chasse et de la Pêche du Québec, Québec, 282 p.
- GUITÉ PITRE, Gérard. 1940. « Le milieu gaspésien et ses ressources ». Mémoire de fin d'étude publiée à l'école des sciences sociales, économiques et politiques. Québec : Université Laval. 104 p.
- GUYETTE, Richard P. et Martin A. SPETICH. 2003. « Fire history of oak-pine forests in the Lower Boston Mountains, Arkansas, USA ». *Forest Ecology and Management*, volume 180, numéro 1, pp. 463-474.

- HAEUSSLER, Sybille et Daniel D. KNEESHAW. 2003. « Comparing forest management to natural processes ». Dans *Towards sustainable management of the boreal forest*, sous la dir. de Philip J. Burton, Christian Messier, Daniel W. Smith et Wiktor L. Adamowicz, pp. 41-64. Ottawa, Canada : NRC Research Press.
- HALLIDAY, William E. D. 1937. « A forest classification for Canada ». Canada Department of Mineral Resources, Forest Service, Canada. Bulletin 89.
- HALLIDAY, William E. D. et Andrew W. A. BROWN. 1943. « The distribution of some important forest trees in Canada ». *Ecology*, volume 24, numéro 3, pp. 353-373.
- HANBERRY, Brice B., Brian J. PALIK et He S. HONG. 2012. « Comparison of historical and current forest surveys for detection of homogenization and mesophication of Minnesota forests ». *Landscape Ecology*, volume 27, numéro 10, pp. 1495-1512.
- HANUTA, Irene. 2001. « A reconstruction of wetland information in pre-settlement southern Manitoba using a geographic information system ». *Canadian Water Resources Journal*, volume 26, numéro 2, pp. 183-194.
- HARLOW, William M., Ellswood S. HARRAR et Fred M. WHITE. 1978. « Textbook of dendrology, covering the important forest trees of the United States and Canada; 6th edition ». McGraw-Hill series in forest resources. Frederick, Maryland. 510 p.
- HARVEY, Brian D. et Yves BERGERON. 1989. « Site patterns of natural regeneration following clear-cutting in northwestern Quebec ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 19, numéro 11, pp. 1458-1469.
- HARVEY, Brian D. et Suzanne BRAIS. 2002. « Effects of mechanized careful logging on natural regeneration and vegetation competition in the southeastern Canadian boreal forest ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 32, numéro 4, pp. 653-666.
- HARVEY, Brian D., Alain LEDUC et Yves BERGERON. 1995. « Early postharvest succession in relation to site type in the southern boreal forest of Quebec ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 25, numéro 10, pp. 1658-1672.
- HATCHER, Robert J. 1964. « Balsam fir advance growth after cutting in Québec ». *The Forestry Chronicle*, volume 40, numéro 1, pp. 86-92.

- HÉBERT, Barbara. 2004a. « Études sur *Thuja occidentalis* dans des cédrières de la Gaspésie : 1. Acquisition de connaissances en vue de développer des stratégies sylvicoles favorisant le retour du thuya et 2. Impacts des coupes totales sur les tiges résiduelles du thuya ». Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Gaspé, Québec. 65 p.
- HÉBERT, Barbara. 2004b. « Études sur *Thuja occidentalis* dans des cédrières de la Gaspésie : Mesure de la réaction du thuya à l'éclaircie commerciale et suivi, après 2 ans, d'essais de plantation et d'ensemencement ». Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Gaspé, Québec. 44 p.
- HÉBERT, Barbara. 2007a. « Caractérisation de la régénération et des lits de germination des semis de *Thuja occidentalis* dans une vieille cédrière en Gaspésie, Québec, Canada ». Mémoire de maîtrise en ressources renouvelables. Chicoutimi : Université du Québec à Chicoutimi. 65 p.
- HÉBERT, Barbara. 2007b. « Dynamique de la régénération de *Thuja occidentalis* L. dans de vieilles cédrières mésiques de la Gaspésie ». Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Gaspé, Québec. 43 p.
- HÉBERT, Barbara et Sylvain FORTIN. 2003. « Étude sur *Thuja occidentalis* dans des cédrières de la Gaspésie : Croissance de *Thuja occidentalis*, impacts du feu sur la qualité des tiges de thuya, examen de la survie des thuyas résiduels isolés ou en petits groupes après coupe et essais d'assistance à la régénération du thuya ». Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Gaspé, Québec. 80 p.
- HEITZMAN, Eric, Kurt S. PREGITZER, Raymond O. MILLER, Mike LANASA et Mike ZUIDEMA. 1999. « Establishment and development of northern white-cedar following strip clearcutting ». *Forest Ecology and Management*, volume 123, numéro 2-3, pp. 97-104.
- HÉTU, Bernard et James T. GRAY. 1985. « Le modelé glaciaire du centre de la Gaspésie septentrionale, Québec ». *Géographie Physique et Quaternaire*, volume 39, numéro 1, pp. 47-66.
- HOUGHTON, Richard A. 1994. « The worldwide extend of land-use change ». *BioScience*, volume 44, numéro 5, pp. 305-313.
- HUNTER, Malcolm L. 1990. « Wildlife, forests and forestry: principles of managing forests for biological diversity ». Prentice-Hall. Englewood Cliffs, États-Unis. 370 p.

- HUNTER, Malcolm Jr. 1996. « Benchmark for managing ecosystems: Are human activities natural? ». *Conservation Biology*, volume 10, numéro 3, pp. 695-697.
- HUSTON, Michael. 1979. « A general hypothesis of species diversity ». *American Midland Naturalist*, volume 113, numéro 1, pp. 81-101.
- ILISSON, Triin et Han Y. H. CHEN. 2009. « Response of six boreal tree species to stand replacing fire and clearcutting ». *Ecosystems*, volume 12, numéro 5, pp. 820-829.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2013. « Climate change 2013: The physical science basis ». Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Unis et New-York, États-Unis. 1535 p.
- INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE (IUCN). 2008. « Guidelines for applying protected area management categories ». Gland, Suisse. 86 p.
- IVERSON, Louis R. et Anantha M. PRASAD. 1998. « Predicting abundance of 80 tree species following climate change in the Eastern United States ». *Ecological Monographs*, volume 68, numéro 4, pp. 465-485.
- JACKSON, Scott M., Fred PINTO, Jay R. MALCOLM et Edward R. WILSON. 2000. « A comparison of pre-European settlement (1857) and current (1981-1995) forest composition in central Ontario ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 30, numéro 4, pp. 605-612.
- JETTÉ, Hélène et Pierre J. H. RICHARD. 1992. « Contribution à l'histoire postglaciale de la végétation en Gaspésie méridionale, Québec ». *Géographie Physique et Quaternaire*, volume 43, numéro 3, pp. 273-284.
- JOBIDON, Robert. 1995. « Autécologie de quelques espèces de compétition d'importance pour la régénération forestière au Québec. Revue de littérature ». Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Québec. 180 p.
- JOHNSON, Edward A. et Kiyoko MIYANISHI. 2012. « The boreal forest as a cultural landscape ». *Annals of the New York Academy of Sciences*, volume 1249, pp. 151-165.

- JUMP, Alistair S., Csaba MÁTYÁS et Josep PEÑUELAS. 2009. « The altitude-for-latitude disparity in the range retractions of woody species ». *Trends in Ecology & Evolution*, volume 24, numéro 12, pp. 694-701.
- KASHIAN, Daniel M. William H. ROMME et Claudia M. REGAN. 2007. « Reconciling divergent interpretations of quaking aspen decline on the northern Colorado Front Range ». *Ecological Applications*, volume 17, numéro 5, pp. 1296-1311.
- KAUFFMAN, Matthew J., Jedediah F. BRODIE et Erik S. JULES. 2010. « Are wolves saving Yellowstone's aspen? A landscape-level test of a behaviorally mediated trophic cascade ». *Ecology*, volume 91, numéro 9, pp. 2742-2755.
- KAY, Charles E. 1997. « Is aspen doomed? ». *Journal of Forestry*, volume 95, numéro 5, pp. 4-11.
- KEANE, Robert E., Paul F. HESSBURG, Peter B. LANDRES et Fred J. SWANSON. 2009. « The use of historical range and variability (HRV) in landscape management ». *Forest Ecology and Management*, volume 258, numéro 7, pp. 1025-1037.
- KEANE, Robert E., Donald MCKENZIE, Donald A. FALK, Erica A. H. SMITHWICK, Carol MILLER et Lara-Karena B. KELLOGG. 2015. « Representing climate, disturbance, and vegetation interactions in landscape models ». *Ecological Modelling*, volume 309-310, pp. 33-47.
- KEDDY, Paul A., Harold T. LEE et Irene C. WISHEU. 1993. « Choosing indicators of ecosystem integrity: wetlands as a model system ». Dans *Ecological integrity and the management of ecosystems*, sous la dir. de Stephen Woodley, James Kay et George Francis, pp. 61-79. Ottawa, Ontario : St-Lucie Press.
- KNEESHAW, Daniel D. 2001. « Are non-fire gap disturbances important to boreal forest dynamics? ». Dans *Recent Research Developments in Ecology*, sous la dir. de S. G. Pandalarai, pp. 43-58, Trivandrum, Inde : Transworld Research Press.
- KNEESHAW, Daniel D. et Yves BERGERON. 1996. « Ecological factors affecting the abundance of advance regeneration in Quebec's southwestern boreal forest ». *Canadian Journal of Forest Research*, Volume 26, numéro 5, pp. 888-898.

- KNEESHAW, Daniel D., Ève LAUZON, André H. DE RÖMER, Gérardo P. REYES, Jonathan BELLE-ISLE, Julie MESSIER et Sylvie GAUTHIER. 2008. « Appliquer les connaissances sur les régimes de perturbations naturelles pour développer une foresterie qui s'inspire de la nature dans le sud de la péninsule gaspésienne ». Dans *Aménagement écosystémique en forêt boréale*, sous la dir. de Sylvie Gauthier, Marie-Andrée Vaillancourt, Alain Leduc, Louis De Grandpré, Daniel D. Kneeshaw, Hubert Morin, Pierre Drapeau et Yves Bergeron, pp. 215-240. Presses de l'Université du Québec. Québec.
- KÖESTLER, Josef N., 1959. « Sapinières du Saint-Laurent ». *Journal Forestier Suisse*, volume 110, numéro 3, pp. 149-162.
- KRANKINA, Olga N., Richard A. HOUGHTON, Mark E. HARMON, Edward H. HOGG, David BUTMAN, Mikhail YATSKOV, Manuela HUSO, Rudolf F. TREYFELD, Vyacheslav N. RAZUVAEV et Gody SPYCHER. 2005. « Effects of climate, disturbance, and species on forest biomass across Russia ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 35, numéro 9, pp. 2281-2293.
- KULAKOWSKI, Dominik, Thomas T. VEBLEN et Sarah DRINKWATER. 2004. « The persistence of quaking aspen (*Populus tremuloides*) in the Grand Mesa area, Colorado ». *Ecological Applications*, volume 14, numéro 5, pp. 1603-1614.
- KULAKOWSKI, Dominik, Thomas T. VEBLEN et Brien P. KURZEL. 2006. « Influences of infrequent fire, elevation and pre-fire vegetation on the persistence of quaking aspen (*Populus tremuloides* Michx.) in the Flat Tops area, Colorado, USA ». *Journal of Biogeography*, volume 33, numéro 8, pp. 1397-1413.
- KULAKOWSKI, Dominik, Margot W. KAYE et Daniel M. KASHIAN. 2013a. « Long-term aspen cover change in the western US ». *Forest Ecology and Management*, volume 299, pp. 52-59.
- KULAKOWSKI, Dominik, Carolyn MATTHEWS, Daniel JARVIS et Thomas T. VEBLEN. 2013. « Compounded disturbances in sub-alpine forests in western Colorado favour future dominance by quaking aspen (*Populus tremuloides*) ». *Journal of Vegetation Science*, volume 24, numéro 1, pp. 168-176.
- KURZEL, Brian P., Thomas T. VEBLEN et Dominik KULAKOWSKI. 2007. « A typology of stand structure and dynamics of Quaking aspen in northwestern Colorado ». *Forest Ecology and Management*, volume 252, numéro 1-3, pp. 176-190.

- LABELLE, Claude et Pierre J. H. RICHARD. 1984. « Histoire postglaciaire de la végétation dans la région de Mont-Saint-Pierre, Gaspésie, Québec ». *Géographie Physique et Quaternaire*, volume 38, numéro 3, pp. 257-274.
- LACHANCE, Denis, Claude MONNIER, Jean-Pierre BÉRUBÉ et René PAQUET. 1990. « Insectes et maladies des forêts dans la région du Bas-Saint-Laurent/Gaspésie de 1936 à 1987 ». Ministère des Approvisionnements et Services Canada, Québec. 223 p.
- LAFLAMME, Jason. 2012. « Comparaison des paysages forestiers préindustriels (1804-1864 et actuels (1982-2006) sur la base de la classification écologique dans la vallée de la rivière Gatineau, Québec, Canada ». Mémoire de maîtrise en sciences forestières. Québec : Université Laval. 85 p.
- LAFLAMME, Jason, Alison D. MUNSON, Pierre GRONDIN et Dominique ARSENEAULT. 2016. « Anthropogenic disturbances create a new vegetation toposequence in the Gatineau River Valley, Quebec ». *Forests*, volume 7, numéro 11 DOI : 10.3390/f7110254.
- LAFOND, André et Gilles LADOUCEUR. 1968. « Les groupements forestiers de la province de Québec ». Ministère des Terres et Forêts, Gouvernement du Québec, Québec. 179 p.
- LANDHÄUSSER, Simon M., Dominique DESHAIES et Victor J. LIEFFERS. 2010. « Disturbance facilitates rapid range expansion of aspen into higher elevations of the Rocky Mountains under a warming climate ». *Journal of Biogeography*, volume 37, numéro 1, pp. 68-76.
- LANGELIER, Jean-Chrysostome. 1884. « Esquisse sur la Gaspésie. Deuxième édition ». Typographie de C. Darveau, Québec. 178 p.
- LANGELIER, Jean-Chrysostome. 1905. « Richesse forestière de la province de Québec ». Association forestière canadienne. Assemblée annuelle. Québec. 58 p.
- LANGELIER, Jean-Chrysostome. 1906. « Les arbres de commerce de la province de Québec ». Ministère des Terres et Forêts, Gouvernement du Québec, Québec.
- LAPOINTE, Pascal. 2013. « Épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette au nord du Lac-Saint-Jean à travers les arbres subfossiles ». Mémoire de maîtrise en ressources renouvelables. Chicoutimi : Université du Québec à Chicoutimi. 51 p.

- LAQUERRE, Simon, Brian D. HARVEY et Alain LEDUC. 2011. « Spatial analysis of response of trembling aspen patches to clearcutting in black spruce-dominated stands ». *The Forestry Chronicle*, volume 87, numéro 1, pp. 77-85.
- LAROUCHE, Catherine. 2006. « Raréfaction du thuya ». Dans *Les enjeux de biodiversité relatifs à la composition forestière*, sous la dir. de Pierre Grondin et Agathe Cimon, 32 p. Ministère des Ressources Naturelles de la Faune et des Parcs, Gouvernement du Québec, Québec. 32 p.
- LARSEN, Chris P. S., Barry J. KRONENFELD et Yi-Chen WANG. 2012. « Forest composition: more altered by future climate change than by euro-american settlement in western New-York and Pennsylvania? ». *Physical Geography*, volume 33, numéro 1, pp. 3-20.
- LAUZON, Ève, Daniel D. KNEESHAW et Yves BERGERON. 2007. « Reconstruction of fire history (1680-2003) in Gaspesian mixedwood boreal forests of eastern Canada ». *Forest Ecology and Management*, volume 244, numéro 1-3, pp. 41-49.
- LEADBITTER, Paul, David EULER et Brian NAYLOR. 2002. « A comparison of historical and current forest cover in selected areas of the Great Lakes-St. Lawrence Forest of central Ontario ». *The Forestry Chronicle*, volume 78, numéro 4, pp. 522-529.
- LEGENDRE, Pierre et Louis LEGENDRE. 2012. « Numerical Ecology, 3rd edition » Elsevier. Amsterdam, Pays-Bas. 990 p.
- LEGROS, Arthur G. 1964. « Charles Robin on the Gaspé Coast 1766 ». *Revue d'Histoire de la Gaspésie*, volume 2, numéro 3, pp. 141-151.
- LE GROUPE DRYADE. 1986. « Étude de l'importance du rôle écologique du feu dans les parcs nationaux de la région du Québec ». Parcs Canada, Québec. 172 p.
- LÉVESQUE, François. 1997. « Conséquences de la dynamique de la mosaïque forestière sur l'intégrité écologique du Parc National Forillon ». Mémoire de maîtrise en foresterie, Québec : Université Laval. 151 p.
- LIKENS, Gene E. 1989. « Long term studies in ecology. Approaches and alternatives ». Springer-Verlag, New-York. 214 p.
- LITVAITIS, John A. « Are pre-Columbian conditions relevant baselines for managed forests in the northeastern United States? ». *Forest Ecology and Management*, volume 183, numéro 1-2, pp. 113-126.

- LIVINGSTONE, Daniel A. 1968 « Some interstadial and postglacial pollen diagrams from eastern Canada ». *Ecological Monographs*, volume 38, numéro 2, pp. 87-125.
- LORIMER, Craig G. 1977. « The presettlement forest and natural disturbance cycle of northeastern Maine ». *Ecology*, volume 58, numéro 1, pp. 139-148.
- LORIMER, Craig G. 1980. « The use of land survey records in estimating presettlement fire frequency ». *Proceedings of the Fire History Workshop*, 20-24 Octobre 1980, Tucson, Arizona, pp. 57-62.
- LORIMER, Craig G. 2001. « Historical and ecological roles of disturbance in eastern North American forests: 9,000 years of change ». *Wildlife Society Bulletin*, volume 29, numéro 2, pp. 425-439.
- LORIMER, Craig G. 2008. « Eastern white pine abundance in 19th century forests: A reexamination of evidence from land surveys and lumber statistics ». *Journal of Forestry*, volume 106, numéro 5, pp. 253-260.
- LOW, Albert P. 1884. « Report on exploration and surveys in the interior of the Gaspé Peninsula ». Commission géologique du Canada, Montréal, Québec.
- LUTZ, Henry J. 1930. « Original forest composition in northwestern Pennsylvania as indicated by early land survey notes ». *Journal of Forestry*, volume 28, numéro 8, pp. 1098-1103.
- LUTZ, Serge G. 1997. « Pre-european settlement and present forest composition in Kings county, New Brunswick, Canada ». Mémoire de maîtrise en foresterie. Fredericton : University of New-Brunswick. 48 p.
- MACARTHUR, James D. 1963. « Effect of mechanized logging on the composition of balsam fir stand in the Gaspé peninsula ». *Pulp and Paper Magazine of Canada*, Woodland Review Section, Avril, pp. 208-210.
- MACARTHUR, James D. 1964. « A study of regeneration after fire in the Gaspé region ». Department of Forestry, Forest Research Branch, Ottawa, Ontario. 20 p.
- MACARTHUR, James D. et J. Daniel GAGNON. 1959. « Age ranges of post-fire black spruce and balsam fir in two poorly stocked Gaspé burn » Department of Northern Affairs and National Resources, Forestry Branch, Forest Research Division, Ottawa, Ontario. 21 p.

- MACARTHUR, James D. et J. Daniel GAGNON. 1961. « Some observations of forest conditions after fire in the Gaspé Peninsula » Department of Northern Affairs and National Resources, Forestry Branch, Forest Research Division, Ottawa, Ontario. 25 p.
- MACKINNON, Wayne E. et David A. MACLEAN. 2003. « The influence of forest and stand conditions on spruce budworm defoliation in New Brunswick, Canada ». *Forest Science*, volume 49, numéro 5. pp. 657-667.
- MACLEAN, David A. et Allison R. ANDERSEN. 2008. « Impact of a spruce budworm outbreak in balsam fir and subsequent stand development over a 40-year period ». *The Forestry Chronicle*, volume 84, numéro 1, pp. 60-69.
- MAISSUROW, Donald K. 1935. « Fire as a necessary factor in the perpetuation of white pine ». *Journal of Forestry*, volume 33, numéro 4, pp. 373-378.
- MANN, Michael E., Raymond S. BRADLEY et Malcolm K. HUGHES. 1998. « Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries ». *Nature*, volume 392, numéro 6678, pp. 779-787.
- MANN, Michael E., Raymond S. BRADLEY et Malcolm K. HUGHES. 1999. « Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitation ». *Geophysical Research Letters*, volume 26, numéro 6, pp. 759-762.
- MARCOUX, Nancy et Pierre J. H. RICHARD. 1995. « Végétation et fluctuations climatiques postglaciaires sur la côte septentrionale gaspésienne, Québec ». *Canadian Journal of Earth Sciences*, volume 32, numéro 1, pp. 79-96.
- MARTEL, Fernand et Gérard TANGUAY. 1982. « L'arpentage primitif : plus de 350 ans d'histoire » Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de l'arpentage, Québec. 12 p.
- MAURI ORTUNO, Eduard. 2010. « Modélisation de la distribution précoloniale du pin blanc en Moyenne-Mauricie à partir des carnets d'arpentage ». Mémoire de maîtrise en foresterie. Québec : Université Laval. 89 p.
- MESSIER, Christian, Klaus PUETTMANN, Robin CHAZDON, Krister ANDERSON, Virginie A. ANGERS, Lluís BRONTONS, Élise FILOTAS, Rebecca TITTLER, Lael PARROTT, Simon A. LEVIN. 2015. « From management to stewardship: Viewing forests as complex adaptive systems in an uncertain world ». *Conservation Letters*, volume 8, numéro 5, pp. 368-377.

- MINISTÈRE DES FORÊTS DE LA FAUNE ET DES PARCS (MFFP). 2015. « Norme de stratification écoforestière, quatrième inventaire écoforestier du Québec méridional ». Direction des inventaires forestiers. Gouvernement du Québec, Québec. 101 p.
- MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS (MFFP). 2016a. « Normes d'inventaire forestier, placettes-échantillons temporaires. Normes techniques ». Direction des inventaires forestiers. Gouvernement du Québec, Québec. 172 p.
- MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS (MFFP). 2016b. « Données sur les perturbations naturelles – insectes : tordeuse des bourgeons de l'épinette ». Base de données ouvertes québécoises. Direction de la protection des forêts. Gouvernement du Québec, Québec.
- MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS (MFFP). 2017. « Base de données sur les feux de forêt (1940 à 2007) ». Gouvernement du Québec, Québec.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE (MRNF). 2008. « La forêt, pour construire le Québec de demain ». Gouvernement du Québec, Québec. 72 p.
- MLADENOFF, David J., Mark A. WHITE, John PASTOR et Thomas R. CROW. 1993. « Comparing spatial pattern in unaltered old-growth and disturbed forest landscapes ». *Ecological Applications*, volume 3, numéro 2, pp. 294-306.
- MORGAN, Penelope, Gregory H. APLET, Jonathan B. HAUFLER, Hope C. HUMPHRIES, Margaret M. MOORE et W. Dale WILSON. 1994. « Historical range of variability: a useful tool for evaluating ecosystem change ». *Journal of Sustainable Forestry*, volume 2, numéro 1, pp. 87-111.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). 2017. « Trends in atmospheric carbon dioxide ». Earth system research laboratory. Global monitoring division. Global greenhouse gas reference network. En ligne. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html>. Consulté le 25 juillet 2017.
- NAVRATIL, Stan, Imre E. BELLA et Everett B. PETERSON. 1989. « Silviculture and management of aspen in Canada: The western Canada scene ». Dans *Aspen Symposium '89*, sous la dir. de Roy D. Adams, pp. 39-60. United States Department of Agriculture Forest Service, North Central Experiment Station. Saint Paul, Minnesota.

- NEILSON, Ronald P. 1993. « Transient ecotone response to climatic change: Some conceptual and modelling approaches ». *Ecological Applications*, volume 3, numéro 3, pp. 385-395.
- NOLET, Philippe, Sylvain DELAGRANGE, Daniel BOUFFARD, Frédéric DOYON et Éric FORGET. 2008. « The successional status of sugar maple (*Acer saccharum*), revisited ». *Annals of Forest Science*, volume 65, numéro 2, pp. 208-217.
- NOSS, Reed F. 1985. « On characterizing presettlement vegetation: how and why ». *Natural Areas Journal*, volume 5, numéro 1, pp. 5-19.
- NOWACKI, Gregory J. et Marc D. ABRAMS. 2015. « Is climate an important driver of post-European vegetation change in the Eastern United States? ». *Global Change Biology*, volume 21, numéro 1, pp. 314-334.
- NOWACKI, Gregory J. et Paul A. TRIANOSKY. 1993. « Literature on old-growth forests of eastern North America ». *Natural Areas Journal*, volume 13, numéro 2, pp. 87-107.
- OLIVER, Chadwick D. et Bruce C. LARSON. 1996 « Forest stand dynamics ». Wiley, New York. 520 p.
- OOSTING, Henry J. et John F. REED. 1944. « Ecological composition of pulpwood forests in northwestern Maine ». *American Midland Naturalist*, volume 31, numéro 1, pp. 182-210.
- ÖSTLUND, Lars, Olle ZACKRISSON et Anna L. AXELSSON. 1997. « The history and transformation of a Scandinavian boreal forest landscape since the 19th century ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 27, numéro 8, pp. 1198-1206.
- PAYETTE, Serge, Louise FILION et Ann DELWAIDE. 1996. « The recent sugar maple decline in southern Quebec: probable causes deduced from tree rings ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 26, numéro 6, pp. 1069-1078.
- PARKER, George R., Donald J. LEOPOLD et Joel K. EICHENBERGER. 1985. « Tree dynamics in an old-growth, deciduous forest ». *Forest Ecology and Management*, volume 11, numéro 1-2, pp. 31-57.
- PASTOR, John et W. Mac POST. 1988. « Response of northern forests to CO<sub>2</sub>-induced climate change ». *Nature*, volume 334, numéro 6177, pp. 55-58.

- PERROTTE-CARON, Olivier et Samuel PINNA. 2012. « Portrait préindustriel de la composition forestière de la péninsule de Forillon ». Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Gaspé, Québec. 20 p.
- PERROTTE-CARON, Olivier, Hironnelle VARADY-SZABO et Annie MALENFANT. 2012. « Portrait de l'organisation spatiale du territoire forestier gaspésien définie d'après la mesure de l'intensité de la fragmentation et de la connectivité des forêts ». Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Gaspé, Québec. 59 p.
- PETRAITIS, Peter S., Roger E. LATHAM et Richard A. NIESENBAUM. 1989. « The maintenance of species diversity by disturbance ». *The Quarterly Review of Biology*, volume 64, numéro 4, pp. 393-4184.
- PILE, Dollette. 1969. « Methods of analysing original vegetation cover using early land survey records ». Mémoire de maîtrise. Hamilton : McMaster University. 126 p.
- PINNA, Samuel, Annie MALENFANT, Barbara HÉBERT et Mathieu CÔTÉ. 2009a. « Portrait forestier historique de la Gaspésie ». Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Gaspé, Québec. 203 p.
- PINNA, Samuel, Hugo JACQMAIN, Mathieu BOUCHARD, Yan BOUCHER, Martin BARRETTE et Mathieu CÔTÉ. 2009b. « Aménagement écosystémique des forêts au Québec - Guide d'élaboration d'un portrait de la forêt préindustrielle comme paysage naturel de référence ». Consortium en foresterie-Gaspésie-Les-Îles et ministères des Ressources Naturelles et de la Faune, Québec. 28 p.
- PINTO, Fred, Stephen ROMANIUK et Murray FERGUSON. 2008. « Changes to preindustrial forest tree composition in central and northeastern Ontario, Canada ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 38, numéro 7, pp. 1842-1854.
- PLIENINGER, Tobias, Hélène DRAUX, Nora FAGERHOLM, Claudia BIELING, Matthias BÜRGI, Thanasis KIZOS, Tobias KUEMMERLE, Jørgen PRIMDAHL et Peter H. VERBURG. 2016 « The driving forces of landscape change in Europe: A systematic review of the evidence ». *Land Use Policy*, volume 57, pp. 204-214.
- PLOURDE, Pierre-Yves, et Réjean GAGNON. 1996. « Évaluation du cycle de feux dans le secteur sud du Parc national Forillon ». Laboratoire d'écologie végétale, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Québec. 34 p.
- POTZGER, John E. 1953. « Nineteen bogs from southern Quebec ». *Canadian Journal of Botany*, volume 31, numéro 4, pp. 383-401.

- PURESWARAN, Deepa S., Louis DE GRANDPRÉ, David PARÉ, Anthony TAYLOR, Martin BARRETTE, Hubert MORIN, Jacques RÉGNIÈRE et Daniel D. KNEESHAW. 2015. « Climate-induced changes in host tree–insect phenology may drive ecological state-shift in boreal forests ». *Ecology*, volume 96, numéro 6, pp. 1480-1491.
- RICHARD, Pierre J. H. 1994. « Postglacial palaeophytogeography of the eastern St. Lawrence River Watershed and the climatic signal of the pollen record ». *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, volume 109, numéro 2-4, pp. 137-161.
- RICHARD, Pierre J. H. 1997. « Récurrence naturelle des feux pendant les derniers 2000 ans dans la région du parc national Forillon, Gaspésie. Étude de potentiel de la méthode anthracologique dans le contexte gaspésien ». Rapport de recherche présenté à Parcs Canada. Laboratoire Jacques Rousseau, Université de Montréal, Montréal, Québec. 78 p.
- RICHARD, Pierre J. H. et Claude LABELLE. 1989. « Histoire postglaciaire de la végétation au lac du Diable, mont Albert, Gaspésie, Québec ». *Géographie Physique et Quaternaire*, volume 43, numéro 3, pp. 337-354.
- RICHARD, Pierre J. H., Jean J. VEILLETTE, Alayn C. LAROUCHE, Bernard HÉTU, James T. BRAY et Pierre GANGLOFF. 1997. « Chronologie de la déglaciation en Gaspésie : nouvelles données et implications ». *Géographie Physique et Quaternaire*, volume 51, numéro 2, pp. 163-184.
- RIPPLE, William J. et Robert L. BESCHTA. 2012. « Trophic cascades in Yellowstone: The first 15 years after wolf reintroduction ». *Biological Conservation*, Volume 145, numéro 1, pp. 205-213.
- ROBITAILLE, André et Jean-Pierre SAUCIER. 1998. « Paysage régionaux du Québec méridional », Direction de la Gestion des Stocks Forestiers et Direction des Relations Publiques, Ministère des Ressources Naturelles du Québec. Publication du Québec, Québec. 213 p.
- ROMME, William H., Monica G. TURNER, Robert H. GARDNER, William W. HARGROVE, Gerald A. TUSKAN, Don G. DESPAIN et Roy. A. RENKIN. 1997. « A rare episode of sexual reproduction in Aspen (*Populus tremuloides* Michx.) following the 1988 Yellowstone fires ». *Natural Areas Journal*, volume 17, numéro 1, pp. 17-25.

- ROMME, William H., Monica G. TURNER, Gerald A. TUSKAN et Rebecca A. REED. 2005. « Establishment, persistence, and growth of aspen (*Populus tremuloides*) seedlings in Yellowstone National Park ». *Ecology*, volume 86, numéro 2, pp. 404-418.
- ROMPRÉ, Ghislain, Yan BOUCHER, Louis BÉLANGER, Sylvie CÔTÉ et Douglas W. ROBINSON. 2010. « Conserving biodiversity in managed forest landscapes: The use of critical thresholds for habitat ». *The Forestry Chronicle*, volume 86, numéro 5, pp. 589-596.
- ROUILLARD, Eugène. 1914. « Dictionnaire des rivières et des lacs de la province de Québec ». Département des terres et forêts, Québec. 432 p.
- ROWE, John S. 1972. « Forest regions of Canada ». Information Canada, Ottawa, Ontario. 172 p.
- RUEL, Jean-Claude. 2000. « Factors influencing windthrow in balsam fir forests: from landscape studies to individual tree studies ». *Forest Ecology and Management*, volume 135, numéro 1-3, pp. 169-178.
- RUEL, Jean-Claude et Robert BENOIT. 1999. « Analyse du chablis du 7 novembre 1994 dans les régions de Charlevoix et de la Gaspésie, Québec, Canada ». *The Forestry Chronicle*, volume 75, numéro 2, pp. 293-301.
- RUEL, Jean-Claude, Daniel PIN et Kevin COOPER. 1998. « Effect of topography on wind behavior in a complex terrain ». *Forestry*, volume 71, numéro 3, pp. 261-265.
- RUEL, Jean-Claude et Marius PINNEAU. 2002. « Windthrow as an important process for white spruce regeneration ». *The Forestry Chronicle*, volume 78, numéro 5, pp. 732-738.
- SAMPSON, Arthur W. 1916. « The stability of aspen as a type ». *Proceedings of the Society of American Foresters*, volume 1, numéro 11, pp. 86-87.
- SANDS, Benjamin A. et Marc D. ABRAMS. 2011. « A 183-year history of fire and recent fire suppression impacts in select pine and oak forest stands of the Menominee Indian reservation, Wisconsin ». *American Midland Naturalist*, volume 166, numéro 2, pp. 325-338.

- SANTER, Benjamin D., Karl E. TAYLOR, Tom M. L. WIGLEY, Timothy C. JOHNS, Philip D. JONES, David J. KAROLY, John F. B. MITCHELL, Anraham H. OORT, Joyce P. PENNER, Venkatachalam RAMASWAMY, M. Daniel SCHWARZKOPF, Ronald J. STOUFFER et Simon F. B. TETT. 1996. « A search for human influences on the thermal structure of the atmosphere ». *Nature*, volume 382, numéro 6586, pp. 39-46.
- SCHULTE, Lisa A. et David J. MLADENOFF. 2001. « The original US public land survey records: Their use and limitations in reconstructing presettlement vegetation ». *Journal of Forestry*, volume 99, numéro 10, pp. 5-10.
- SCOGGAN, Homer J. 1950. « The flora of Bic and the Gaspé Peninsula, Quebec ». Department of Resources and development, Development Services Branch, Gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario. 399 p.
- SCULL, Peter R. et Jana L. RICHARDSON. 2007. « A method to use ranked timber observations to perform forest composition reconstruction from land survey data ». *American Midland Naturalist*, volume 158, numéro 2, pp. 446-460.
- SEARS, Paul B. 1925. « The natural vegetation of Ohio ». *The Ohio Journal of Science*, volume 25, numéro 3, pp. 139-149.
- SERVICE DE PROTECTION CONTRE LES INCENDIES. 1906-1939. Rapport annuel du ministre des Terres et Forêts du Québec. Documents de la Session. Québec.
- SERVICE DE RENSEIGNEMENT SUR LES RESSOURCES NATURELLES. 1926. « La Gaspésie : ses ressources naturelles et son développement économique ». Ministère de l'intérieur, Gouvernement du Canada, Ottawa, Canada, 42 p.
- SHINNEMAN, Douglas J., William L. BAKER, Paul C. ROGERS et Dominik KULAKOWSKI. 2013. « Fire regimes of quaking aspen in the Mountain West ». *Forest Ecology and Management*, volume 299, pp. 22-34.
- SICCAMA, Thomas G. 1971. « Presettlement and present forest vegetation in northern Vermont with special reference to Chittenden county ». *American Midland Naturalist*, volume 85, numéro 1, pp. 153-172.
- SOCIÉTÉ DE PROTECTION DES FORÊTS CONTRE LES INCESTES ET MALADIES (SOPFIM). 1992. « Programme quinquennal (1993-1997) de pulvérisation aérienne d'insecticides contre certains insectes forestiers. Tome 1 - tordeuse des bourgeons de l'épinette ». Étude d'impact sur l'environnement réalisé par Lavalin Environnement Inc, Québec. 839 p.

- SOCIÉTÉ DE PROTECTION DES FORÊTS CONTRE LES INCESTES ET MALADIES (SOPFIM). 2011. « Délimitation des secteurs forestiers admissibles aux pulvérisations aériennes d'insecticide biologique pour lutter contre la tordeuse des bourgeons de l'épinette ». Rapport d'avancement des travaux. 29 p.
- ST-CLAIR, Samuel B. et Jonathan P. LYNCH. 2005. « Differences in the success of sugar maple and red maple seedlings on acid soils are influenced by nutrient dynamics and light environment ». *Plant, Cell and Environment*, volume 28, numéro 7, pp. 874-885.
- STEEDMAN, Robert et Wolfgang HAIDER. 1993. « Applying notions of ecological integrity ». Dans *Ecological integrity and the management of ecosystems*, sous la dir. de Stephen Woodley, James Kay et George Francis, pp. 47-60. Ottawa, Ontario : St-Lucie Press.
- STRAHAN, Robert T., Andrew J. SÁNCHEZ MEADOR, David W. HUFFMAN et Daniel C. LAUGHLIN. 2016. « Shifts in community-level traits and functional diversity in a mixed conifer forest: a legacy of land-use change ». *Journal of Applied Ecology*, volume 53, numéro 6, pp. 1755-1765.
- SUFFLING, Roger, Michael EVANS et Ajith H. PERERA. 2003. « Presettlement forest in southern Ontario: Ecosystems measured through a cultural prism ». *The Forestry Chronicle*, volume 79, numéro 3, pp. 485-500.
- SWAINE, James M. et Frank C. CRAIGHEAD. 1924. « Studies on the spruce budworm (*Cacoecia fumiferana* Clem.). Part I. A general account of the outbreaks, injury and associated insect ». Department of Agriculture. Ottawa, Ontario. 91 p.
- TERRAIL, Raphaële. 2013. « Influence de la colonisation sur les transformations du paysage forestier depuis l'époque préindustrielle dans l'Est du Québec (Canada) ». Thèse de doctorat en biologie. Rimouski : Université du Québec à Rimouski. 115 p.
- TERRAIL, Raphaële, Dominique ARSENEAULT, Marie-Josée FORTIN, Sébastien DUPUIS et Yan BOUCHER. 2014. « An early forest inventory indicates high accuracy of forest composition data in pre-settlement land survey records ». *Journal of Vegetation Science*, volume 25, numéro 3, pp. 691-702.
- THOMAS-VAN GUNDY, Melisa A. et Gregory J. NOWACKI. 2013. « The use of witness trees as pyro-indicators for mapping past fire conditions ». *Forest Ecology and Management*, volume 304, numéro, pp. 333-344.

- THOMPSON, Ian D., Julie H. SIMARD et Rodgers D. TITMAN. 2006. « Historical changes in white pine (*Pinus strobus* L.) density in Algonquin Park, Ontario, during the 19th century ». *Natural Areas Journal*, volume 26, numéro 1, pp. 61-71.
- THOMPSON, Jonathan R., Dunbar N. CARPENTER, Charles V. COGBILL et David R. FOSTER. 2013. « Four centuries of change in northeastern United States forests ». *PLoS One*, volume 8, numéro 9, pp. e72540.
- TREMBLAY, M. Francine, Yves BERGERON, Danielle LALONDE et Yves MAUFFETTE. 2002. « The potential effects of sexual reproduction and seedling recruitment on the maintenance of red maple (*Acer rubrum* L.) populations at the northern limit of the species range ». *Journal of Biogeography*, volume 29, numéro 3, pp. 365-373.
- TREMBLAY-DAOUST, Ariane. 2011. « Dynamique du chêne rouge à sa limite nordique de distribution naturelle au Parc National Forillon, Gaspésie (Québec) ». Mémoire de maîtrise en gestion de la faune et de ses habitats. Rimouski : Université du Québec à Rimouski. 56 p.
- TULOWIECKI, Stephen J. 2014. « Using vegetation data within presettlement land survey records for species distribution modeling: A tale of two datasets ». *Ecological Modelling*, volume 291, numéro 10, pp. 109-120.
- TURNER, Monica. 2010. « Disturbance and landscape dynamics in a changing world ». *Ecology*, volume 91, numéro 10, pp. 2833-2849.
- VADEBONCOEUR, Matthew A., Steven P. HAMBURG, Charles V. COGBILL et Wendy Y. SUGIMURA. 2012. « A comparison of presettlement and modern forest composition along an elevation gradient in central New Hampshire ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 42, numéro 1, pp. 190-202.
- VARADY-SZABO, Hirondelle, Mathieu CÔTÉ, Yan BOUCHER, Geneviève BRUNET et Hélène JETTÉ. 2008. « Guide pour la description des principaux enjeux écologiques dans les plans régionaux de développement intégré des ressources et du territoire - Document d'aide à la mise en oeuvre de l'aménagement écosystémique ». Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. Québec. 61 p.
- VAYREDA, Jordi, Jordi MARTINEZ-VILALTA, Marc GRACIA, Josep G. CANADELL et Javier RETANA. 2016. « Anthropogenic-driven rapid shifts in tree distribution lead to increased dominance of broadleaf species ». *Global Change Biology*, volume 22, numéro 12, pp. 3984-3995.

- VINCENT, Arleigh B. 1962. « Development of balsam fir thickets in the green river watershed following the spruce budworm outbreak of 1913-1919 ». Gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario. 20 p.
- VITOUSEK, Peter M. 1994. « Beyond global warming: Ecology and global change ». *Ecology*, volume 75, numéro 7, pp. 1861-1876.
- VITOUSEK, Peter M., Harold A. MOONEY, Jane LUBCHENCO et Jerry M. MELILLO. 1997. « Human domination of Earth's ecosystems ». *Science*, volume 277, numéro 5325, pp. 494-499.
- VOLNEY, W. Jan A. et Richard A. FLEMING. 2000. « Climate change and impacts of boreal forest insects ». *Agriculture, Ecosystems & Environment*, volume 82, numéro 1-3, pp. 283-294.
- WALTHER, Gian-Reto, Eric POST, Peter CONVEY, Annette MENZEL, Camille PARMESAN, Trevor J. C. BEEBEE, Jean-Marc FROMENTIN, Ove HOEGH-GULDBERG et Franz BAIRLEIN. « Ecological responses to recent climate change ». *Nature*, volume 416, numéro 6879, pp. 389-395.
- WANG, Yi-Chen, Barry J. KRONENFELD et Chris P. S. LARSEN. 2009. « Spatial distribution of forest landscape change in western New York from presettlement to the present ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 39, numéro 1, pp. 76-88.
- WANG, Wen J., Hong S. HE, Frank R. THOMSPSON III, Jacob S. FRASER, Brice B. HANBERRY et William D. DIJAK. 2015. « Importance of succession, harvest, and climate change in determining future composition in U.S. Central Hardwood Forests ». *Ecosphere*, volume 6, numéro 12, pp. 1-18.
- WEBB, Leland S. 1957. « The growth and development of balsam fir in Gaspé ». *Pulp and Paper Magazine of Canada*, Woodland Review Section, July, pp. 206-214.
- WEBB, Leland S. 1961. « Clear cutting of pulpwood in the balsam fir spruce forest of Gaspé ». *Pulp and Paper Magazine of Canada*, Woodland Review Section, September, pp. 236-248.
- WEIN, Ross W. et Janice M. MOORE. 1977. « Fire history and rotations in the New Brunswick Acadian Forest ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 7, numéro 2, pp. 285-294.

- WEIN, Ross W. et Janice M. MOORE. 1979. « Fire history and recent fire rotation periods in the Nova Scotia Acadian Forest ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 9, numéro 2, pp. 166-178.
- WEIR, Jeff M. H. et Edward A. JOHNSON. 1998. « Effects of escaped settlement fires and logging on forest composition in the mixedwood boreal forest ». *Canadian Journal of Forest Research*, volume 28, numéro 3, pp. 459-467.
- WHITE, Mark A. et David J. MLADENOFF. 1994. « Old-growth forest landscape transitions from pre-European settlement to present ». *Landscape Ecology*, volume 9, numéro 3, pp. 191-205.
- WHITNEY, Gordon G. 1994. « From coastal wilderness to fruited plain: a history of environmental change in temperate North America, 1500 to the present ». Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Unis. 451 p.
- WILLIAMS, Mark A. et William L. BAKER. 2012. « Comparison of the higher-severity fire regime in historical (A.D. 1800s) and modern (A.D. 1984-2009) montane forests across 624,156 ha of the Colorado Front Range ». *Ecosystems*, volume 15, numéro 5, pp. 832-847.
- WILLIS, Gary L. et James A. JOHNSON. 1978. « Regeneration of yellow birch following selective cutting of old-growth northern hardwoods ». Michigan Technological University, Ford Forestry Center, L'Anse, Michigan. 24 p.
- WINNIE, John A. 2012. « Predation risk, elk, and aspen: tests of a behaviorally mediate trophic cascade in the Greater Yellowstone Ecosystem ». *Ecology*, volume 93, numéro 12, pp. 2600-2614.
- WIRTH, Tim, Paul MAUS, Jay POWELL, Henry LACHOWSKI, Kevin SUZUKI, Jim MCNAMARA, Pat RIORDAN et Ron BROHMAN. 1996. « Monitoring aspen decline using remote sensing and GIS: Gravelly Mountain, landscape, southwestern Montana ». USDA Forest service, remote sensing applications center, Salt Lake City, Utah. 11 p.
- YAGOUTI, Abderrahmane, Gilles BOULET et Luc VESCOVI. 2006. « Homogénéisation des séries de températures et analyse de la variabilité spatio-temporelle de ces séries au Québec méridional, rapport no. 4 ». Ouranos, Montréal, Québec. 138 p.

YAGOUTI, Abderrahmane, Gilles BOULET, Lucie VINCENT, Luc VESCOVI et Eva MEKIS. 2008. « Observed changes in daily temperature and precipitation indices for southern Québec, 1960-2005 ». *Atmosphere-Ocean*, volume 46, numéro 2, pp. 243-256.

ZHANG, Jian, Shongming HUANG et Fangliang HE. 2015. « Half-century evidence from western Canada shows forest dynamics are primarily driven by competition followed by climate ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, volume 112, numéro 13, pp. 4009-4014.

ZHANG, Yun, Yves BERGERON, Xiu-H. ZHAO et Igor DROBYSHEV. 2015. « Stand history is more important than climate in controlling red maple (*Acer rubrum* L.) growth at its northern distribution limit in western Quebec, Canada » *Journal of Plant Ecology*, volume 8, numéro 4, pp. 368-379.