BIBLIOTHÈQUE
CÉGEP DE L'ABITIBI-TÉMISCAMINGUE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

RECONSTITUTION HISTORIQUE DE LA COMPOSITION DES FORETS PREINDUSTRIELLES BOREALES MIXTES DE L'OUEST DU QUEBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN ÉCOLOGIE

PAR
NATHAN EGANDE

MARS 2022

REMERCIEMENTS

Au terme de notre projet de maitrise, il s'avère indispensable pour nous de témoigner toute notre gratitude et nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué pour la réussite de ce travail de fin d'études. Premièrement ma gratitude revient au Dieu Très-Haut, le Seigneur Jésus-Christ pour Sa Grâce et Sa protection et tout ce qu'Il a été pour moi. Ma reconnaissance va à mon directeur Yves Bergeron pour la confiance qu'il m'avait accordé pour mener ce projet et sa disponibilité, son encadrement et sa passion pour la recherche qui m'a influencé. Je remercie de même mon co-directeur Dominique pour son implication impeccable dans l'encadrement de ce projet avec ses remarques pertinentes. Un coup de cœur à Victor Danneyrolles qui a été à mes côtés guidant mes premiers pas dans la conduite de ce projet jusqu'à la fin, merci pour les rencontres zoom de secours. Merci à Nicole Fenton pour ses commentaires sur mon proposé de recherche. Je pense également à remercier Daniel Lesier pour son coup de main en accès. À Danielle Charron pour son soutien surprise en Abitibi, Paul Mbwase pour son amitié et son coup de main en statistique. Un autre coup de cœur pour mes collègues de promotion à savoir Amira Fetoub pour son énergie positive et la belle ambiance, elle a toujours été présente, merci à Andréane Garant et Animesh Ghose. Un gros coup de cœur à mes parents David et Souzanne Egande qui ont été présents pour moi malgré la distance me témoignant leurs soutiens et toute la famille Egande. Je remercie le pasteur Baruti Kasongo pour ses prières, de même maman Naomi Mwali pour son soutien spirituel, ses appels et encouragement et son amour ainsi que la maman Murphy Angosolo pour ses prières et appels surprise. Je remercie très spécialement ma précieuse sœur Joy Mvutu pour sa motivation. Que tous les autres qui méritent notre gratitude que nous n'avons pas pu citer, trouvent dans notre silence et oublient les mots

et les sentiments de notre reconnaissance. Enfin, le projet a été financé par le biais d'un partenariat industriel parrainé par MITACS avec l'entreprise des produits forestiers Rayonier Advanced Materials (La Sarre, QC).

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES v
LISTE DES TABLEAUX vi
RÉSUMÉ vii
CHAPITRE I INTRODUCTION 1
1.1 Problématique 1
1.2 Contexte global de l'est de l'Amérique du Nord 3
1.3 Les forêts boréales mixtes de l'est de l'Amérique du Nord 4
1.4 Contexte spécifique de l'historique de l'usage des sols dans la région de Rouyn-Noranda 6
1.5 Objectifs et hypothèses de l'étude 7
CHAPITRE II MÉTHODOLOGIE 8
2.1 Aire d'étude 8
2.2 Historique de l'aire d'étude 8
2.3 Méthodes 10
2.3.1 Données préindustrielles 10
2.3.2 Données modernes 11
2.4 Analyses 12
2.5 Historique des perturbations 13
CHAPITRE III RÉSULTATS 14
CHAPITRE IV DISCUSSION 21
4.1 Limitation des archives d'arpentages 21
4.2 Composition des forêts préindustrielles 22
4.3 Changements de composition entre les époques préindustrielle et moderne 24
4.4 Applications pour l'aménagement forestier écosystémique 26
CONCLUSION 28
ANNEXE A CHANGEMENTS DE COMPOSITION SELON LES TYPES DE DÉPÔTS DE SURFACE 29
BIBLIOGRAPHIE 30

LISTE DES FIGURES

Figure Page

2.1 Présentation de l'aire d'étude (1), avec carte détaillée de l'altitude (2) et des observations d'arpentage et des placettes d'échantillonnage modernes (3) 9

3.1 Changements de composition selon les types de dépôts de surface. Pour chaque taxon : "pré." et "mod." indiquent respectivement la fréquence absolue de ce taxon aux époques préindustrielle et moderne. 17

3.2 Comparaison entre la distribution spatiale des temps depuis les derniers feux dans l'aire d'étude (1; d'après Bergeron et al., 2004) et les feux préindustriels observés par les arpenteurs au XXe siècle (2) ainsi que la distribution des perturbations identifiées dans les cartes écoforestières (3). Une majorité des forêts a brulé au cours de la période 1910-1930, et le reste sont issues de feux plus anciens (1700-1850) 18

3.3 (a) Distribution par décennie, des temps depuis feux dans la région d'étude d'après Bergeron et al., 2004 et (b) évolution des surfaces coupées par année d'après les cartes écoforestières. Ces courbes sont basées sur les données montrées dans les cartes de la figure 3.2. Bien que les historique de coupe contenus dans les cartes écoforestières ne remontent pas plus loin que les années 1970, des coupes plus anciennes ont aussi vraisemblablement eu lieu dans la région avant cette période (Lienert 1966). 19

3.4 Cartes des fréquences relatives des principaux taxons aux époques préindustrielle (colonne 1), moderne (colonne 2) et cartes des changements de fréquence relative (colonne 3). Dans les colonnes 1 et 2, la couleur jaune indique que le taxon était absent de la cellule dans la colonne 3 une différence positive indique que le taxon est plus fréquent à la période moderne qu'à la période préindustrielle. Les cellules contenant moins de 5 observations aux époques préindustrielle ou moderne ont été retirées des analyses. 20

LISTE DES TABLEAUX

Tableau Page

3.1 Fréquence absolue et fréquence par rang des taxons pour les périodes préindustrielle (1909-1940) et moderne (1980-2015). Une forte fréquence au premier rang (R1) indique que le taxon tendait à être dominant dans les peuplements tandis que les fréquences aux rangs 2 à 4 indiquent que les taxons tendaient à être codominant ou qu'ils étaient présents comme espèces compagnes dans les peuplements. 16

RÉSUMÉ

Au cours des derniers siècles, les forêts de l'est de l'Amérique du Nord ont été profondément transformées par la colonisation européenne et par le développement de l'exploitation industrielle des ressources forestières. Au Québec, la gestion forestière durable vise parmi ses objectifs à s'inspirer du caractère naturel des forêts au travers de l'aménagement écosystémique. Dans ce contexte, les caractéristiques des forêts en place avant l'exploitation industrielle, les forêts préindustrielles permettent d'établir des états de référence pour l'aménagement écosystémique et la restauration écologique. Ce projet de maitrise avait pour but d'utiliser des archives d'arpentage pour reconstituer la composition préindustrielle des forêts boréales mixtes de la région de Rouyn-Noranda à l'ouest du Québec. À partir de 38 rapports d'arpentage disponibles pour la région (1909-1940), une base de données comportant 3621 observations sur la composition de la forêt a été créée et géoréférencée. Ces observations ont été ensuite analysées et cartographiées afin de dresser un portrait des forêts préindustrielles et des changements survenus dans la région. Les changements de composition ont été déterminés par comparaison avec les inventaires forestiers du gouvernement du Québec des dernières décennies (1980-2015). À l'époque préindustrielle, le taxon "épinette" était le plus fréquent (85,5 %) et le plus dominant (63,9 %), et tendait à être présent sur l'ensemble du territoire et des types de dépôts de surface. Entre les époques préindustrielle et moderne, il y a augmentation des feuillus de début de succession, dont principalement le peuplier (+ 28 %), sa fréquence a particulièrement augmenté sur les dépôts argileux et dans la portion centrale de la région d'étude. Les lignes d'arpentage qui traversaient des milieux rocheux étaient largement dominés par les épinettes, le sapin et le bouleau blanc, et dans une moindre mesure les peupliers et le pin gris. Ces changements dans la composition entre les deux époques sont attribués aux activités de la colonisation (coupe, feux, ouvertures des terres, etc.) et l'exploitation industrielle du bois. Dans le contexte de l'aménagement écosystémique, nos résultats permettent de recommander des pratiques sylvicoles qui favorisent le retour de la composante résineuse et de limiter l'expansion du peuplier faux-tremble.

Mots-clés: Écologie forestière historique, aménagement écosystémique, changement de composition, archives d'arpentage, forêt boréale, Rouyn-Noranda.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Problématique

L'anthropisation des biomes terrestres s'est intensifiée au cours des derniers siècles avec la révolution industrielle et l'explosion démographique des populations humaines (Ellis et al., 2010). Entre les années 1700 et 2000, la biosphère terrestre a connu la transition critique d'essentiellement sauvage à principalement anthropique, les espaces anthropisés couvrent plus de 50% des terres émergées au début du XXIe siècle. À l'heure actuelle, la dynamique des écosystèmes terrestres est principalement contrôlée par des processus anthropiques, comme l'utilisation des sols et les autres interactions humaines avec les écosystèmes (Ellis et al., 2010). Ces pressions liées à l'utilisation des terres pourraient représenter un risque écologique majeur pour la biodiversité (Newbold et al., 2016). Dans ce contexte, la connaissance des caractéristiques écologiques des forêts avant les impacts majeurs des sociétés humaines permet de dresser des états de références pour la restauration écologique et l'aménagement durable des écosystèmes (Egan et Howell, 2001; Higgs et al., 2014).

Les forêts de l'Est de l'Amérique du Nord ont subi d'importantes modifications au cours des derniers siècles. Bien que les populations autochtones aient pu altérer la naturalité de ces forêts depuis plusieurs milliers d'années (Delcourt & Delcourt, 2004), ces impacts étaient probablement faibles et localisés dans le paysage (Munoz et al., 2014). Les impacts des activités humaines se sont intensifiés au cours des derniers

siècles avec la colonisation européenne et l'exploitation industrielle des ressources forestières, en plus de l'exploitation minière. La structure et la composition des forêts actuelles ont été profondément modifiées par rapport aux forêts préindustrielles (Whitney, 1994 ; Cogbill et al., 2002 ; Boucher et al., 2009 ; Dupuis et al., 2011). Dans certaines régions, l'exploitation minière a aussi contribué à dénaturer les espaces forestiers. Ces importants changements dans les caractéristiques des forêts pourraient aussi compromettre le maintien de la biodiversité et des processus écologiques (Gauthier, 2009).

L'aménagement écosystémique des forêts au Québec vise à maintenir la biodiversité dans les forêts aménagées en réduisant les écarts entre les forêts aménagées et les forêts naturelles (Gauthier, 2009; Grenon et al., 2010). Pour la mise en œuvre de l'aménagement forestier écosystémique, la connaissance des caractéristiques des forêts naturelles est donc essentielle. Aussi, dans les territoires qui ont été déjà largement perturbés par les activités humaines, les caractéristiques des forêts préindustrielles permettent d'établir des états de référence historiques pour l'aménagement écosystémique et pour la compréhension des conséquences écologiques de l'exploitation.

Des cartographies et des inventaires forestiers ont été réalisés à la fin du XIXe et au début du XXe siècle dans plusieurs régions, et ils constituent des sources d'information précieuses. Ces données offrent une opportunité unique pour caractériser la variabilité naturelle de l'âge, de la structure et de la composition des forêts préindustrielles, ainsi que l'organisation spatiale de ces caractéristiques. Parmi ces archives historiques, les archives d'arpentage sont des documents écrits, produits au cours du XIXe et du début du XXe siècle, dont le but était de déterminer les nouvelles limites administratives du territoire disponible pour la colonisation (cantons, lots). Les rapports de ces premiers arpentages permettent de reconstituer avec précision la composition des forêts avant la

colonisation et leurs exploitations industrielles (Dupuis et al., 2011; Terrail et al., 2014). Aussi, ces archives ont été largement utilisées pour reconstituer la composition des forêts préindustrielles du Québec (Dupuis et al., 2011; Danneyrolles et al., 2016; Marchais, 2017; Fortin, 2018). Dans cette étude, nous proposons d'utiliser les archives d'arpentage pour documenter la composition préindustrielle et les changements de composition survenus dans les forêts boréales mixtes de la région de Rouyn-Noranda. Nous estimons que ce travail permettra de mieux définir les cibles de l'aménagement écosystémique dans la MRC de Rouyn-Noranda.

1.2 Contexte global de l'est de l'Amérique du Nord

Depuis le début du XIXe siècle, les activités humaines sont devenues une des forces majeures de contrôle des écosystèmes dans plusieurs biomes et sur plusieurs continents, définissant l'Anthropocène. Trommetter et Weber (2004) reconnaissent que le changement climatique, la pollution des eaux et des sols, les changements d'usage des terres, la déforestation et la surexploitation des ressources renouvelables relèvent de ce changement global. Il est probable que ces changements apporteront aux différents milieux naturels de la planète des modifications multiples et variées (Dufour et al., 2008).

Au niveau des écosystèmes forestiers de l'est de l'Amérique du Nord, ce phénomène s'est traduit par des modifications importantes du régime de perturbations, par une augmentation des coupes forestières, le déboisement pour la mise en culture des terres, ou encore la modification des régimes de feux (Whitney, 1994 ; Foster et al., 1998 ; Lorimer, 1977 ; Terrail, 2019). Le feu est intervenu comme élément important dans la modification des écosystèmes forestiers. On sait que depuis le début de la colonisation, au tournant du XIXe siècle, des feux liés à la colonisation ont brulé d'importantes superficies forestières (Fortin et al., 2018 ; Boucher et al., 2009 ; Stambaugh et al., 2018). Associés aux changements climatiques, ces perturbations anthropiques

devraient modifier la dynamique générale des écosystèmes (Terrail, 2019). Les changements globaux peuvent donc potentiellement modifier les écosystèmes forestiers à la fois de manière directe par l'usage des sols et l'exploitation des ressources, et de manière indirecte avec les changements climatiques (Nowacki et Abrams, 2015 ; Danneyrolles, 2019). On projette aussi une intensification de ces changements au cours des prochaines décennies, particulièrement en forêt boréale (GIEC, 2013).

1.3 Les forêts boréales mixtes de l'est de l'Amérique du Nord

Les forêts boréales sont définies comme des forêts poussant dans des environnements de hautes latitudes où les températures froides persistent pendant 6 à 8 mois par année (Burton et al., 2010 ; Gauthier et al., 2015). Les écosystèmes de la forêt boréale ont évolué sous les contraintes imposées par une courte saison de croissance et des hivers rigoureux avec une couverture de neige qui peut durer plusieurs mois (Burton et al., 2010 ; Kneeshaw et al., 2011 ; Gauthier et al., 2015).

Le Canada possède 10% de la biomasse terrestre forestière mondiale (Thompson et Pitt, 2003 ; Brassard et Chen, 2006 ; Bose, 2014) et la forêt boréale du Canada s'étend sur 5,52 millions de kilomètres carrés (Brandt et al., 2013 ; Lachance, 2017). Sur les 417,6 millions d'hectares de forêts canadiennes, 18% sont associés aux forêts boréales mixtes (Thompson et Pitt, 2003 ; Brassard et Chen, 2006 ; Bose, 2014). La forêt boréale mixte est caractérisée par une importante composante feuillue dans sa composition. Dans l'est du Canada, les principales essences résineuses de la forêt boréale mixte sont l'épinette noire (*Picea mariana*), le sapin baumier (*Abies balsamea*), le pin gris (*Pinus banksiana*), l'épinette blanche (*Picea glauca*) et le cèdre (*Thuja occidentalis*) alors que les essences feuillues sont essentiellement le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) et le bouleau à papier (*Betula papyrifera*).

Les feux et les épidémies d'insectes sont les principales perturbations naturelles qui contrôlent la dynamique des forêts boréales mixtes (Bergeron, 2000a, Hanes et al., 2019). Les feux sévères ont pour conséquence de supprimer la canopée et ainsi réinitier le développement de la forêt. Généralement, après le passage du feu, on observe une recolonisation par les feuillus de début de succession (peuplier faux-tremble, bouleau blanc) en association avec les conifères tolérants aux feux (épinette noire, pin gris) (Bergeron et Charron 1994 ; Bergeron 2000a). Par la suite au cours de la succession, les conifères tolérants à l'ombre et mal adaptés aux feux (sapin baumier, épinette blanche, cèdre) reprennent une place plus importante dans le couvert (Bergeron, 2000a). Toutefois, les trajectoires de développement peuvent être très variables en fonction de l'abondance de chaque espèce avant perturbation des conditions de dépôt-drainage, du régime d'humidité et de l'intervalle de temps entre les feux. Par exemple, il est fréquent d'observer le rétablissement après feu du pin gris sur les dépôts bien drainés, ou encore le rétablissement de l'épinette noire dans les sites moins bien drainés (Greene et al., 2004).

Les principales épidémies d'insectes des forêts boréales mixtes de l'est du Canada sont la tordeuse des bourgeons de l'épinette (Boulanger et Arseneault, 2004, Navarro et al., 2018) et la livrée des forêts (Cooke et Lorenzi, 2006). Ces perturbations peuvent également jouer un rôle important dans la succession secondaire et influencer la dynamique de cet écosystème. Les épidémies de tordeuse tendent à tuer le sapin et favoriser d'autres espèces (bouleau à papier, cèdre) (Bouchard et al., 2006). Les épidémies de livrée des forêts peuvent accélérer le remplacement des peupliers par les conifères tolérants à l'ombre (Perrette et al., 2014).

Les coupes forestières, particulièrement avec l'essor de l'industrie du papier au début du XX^{e} siècle, ont principalement visé les conifères. Ces coupes ont eu tendance à favoriser les feuillus de début de succession (peupliers, bouleau blanc). Marchais (2017) a révélé dans ses analyses que la fréquence et la dominance des feuillus, le

tremble avait particulièrement augmenté, alors que les résineux avait fortement diminué. Danneyrolles et al., (2016) a montré que la combinaison des premières coupes industrielles et des grands feux du début du XXe siècle a abouti au remplacement des épinettes noires par des feuillus de début de succession (peupliers et bouleau blancs).

1.4 Contexte spécifique de l'historique de l'usage des sols dans la région de Rouyn-Noranda

La région de Rouyn-Noranda présente certaines particularités dans son historique d'usage des sols par rapport au reste du Québec (Lienert, 1966). Premièrement, la colonisation européenne y a été relativement récente (première moitié du XXe siècle), bien que certaines parties de la région (Kinojevis, Lac Opasatica, etc.) auraient pu connaître une exploitation forestière plus ancienne. Ensuite, la colonisation a été parallèle au développement d'une importante activité minière. Cette période de colonisation est associée à un climat particulièrement propice aux feux. Les défrichements pour l'agriculture et l'exploitation forestière ont tous deux commencé en 1916, et la plupart des zones brulées ont été enregistrées au cours de cette première phase de colonisation (1916–1939) (Lefort et al., 2003). Tous ces facteurs sont donc à l'origine d'une période d'augmentation très importante des feux (Danneyrolles et al., 2021) avec des impacts potentiels considérables sur les paysages forestiers.

La région de Rouyn-Noranda a subi au cours du XX^{e} siècle des perturbations particulièrement intenses, où des coupes forestières (Lienert, 1966) se sont superposées à des feux de colonisation. Ces perturbations ont potentiellement engendré des changements importants dans les écosystèmes forestiers. Par exemple, cette région est caractérisée par des affleurements rocheux dénudés.

1.5 Objectifs et hypothèses de l'étude

Le principal objectif de cette étude est de documenter la composition préindustrielle et les changements de composition forestière de la région de Rouyn-Noranda. Cet objectif peut aussi se décliner en deux sous questions : (1) quelle était la composition des forêts préindustrielles et comment se structuraient-elles à l'échelle du paysage (2) quels sont les changements de composition survenus depuis et quels sont les facteurs qui les ont causés. Les travaux réalisés dans les régions périphériques (Danneyrolles et al., 2016, Marchais, 2017) permettent de poser comme hypothèse que les forêts de la région de Rouyn-Noranda étaient dominées par des essences résineuses (épinettes, sapin, pins) à l'époque préindustrielle. Par suite de la colonisation et l'industrialisation de la région, on s'attend à observer une diminution des conifères et une forte augmentation des feuillus de début de succession (dont principalement le peuplier faux-tremble aujourd'hui abondant dans la région).

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

2.1 Aire d'étude

L'aire d'étude représente la MRC de Rouyn-Noranda, qui couvre environ 3400 km^2 entre les domaines bioclimatiques de la sapinière à bouleau jaune au Sud et de la sapinière à bouleau blanc au nord (Figure 2.1; Robitaille et Saucier, 1998). Le climat est du type tempéré froid avec une température moyenne annuelle de 2,8°C et des précipitations annuelles totales de 948 mm (Environnement Canada, 2021). L'altitude varie entre 260 m et 530 m (Figure 2.1). Les roches de l'Abitibi sont parmi les plus vieilles de la planète (Royer et al., 2000) et on en retrouve de tous les types : ignées, sédimentaires et métamorphiques. Elles sont pour la plupart recouvertes par des dépôts de surface argileux (53%), glaciaire-fluvioglaciaire (20% et 2%, respectivement), rocheux (14%) et organiques (11%).

2.2 Historique de l'aire d'étude

L'aire d'étude se trouve dans la région de l'Abitibi dont la végétation remonte à plus de 8 000 ans avec le retrait des glaciers au début de l'Holocène. Les pins ont envahi les premiers sols à s'assécher, puis toutes les autres espèces : le tremble, le bouleau blanc, le cèdre, le sapin et les épinettes ont colonisé les parties les plus élevées de l'immense plaine argileuse (Bergeron, 2000b). Des traces archéologiques témoignent que les premiers peuples occupent la région depuis au moins 6 000 ans (Vincent, 1995).

Ces premiers occupants vivaient de la chasse et de la cueillette et utilisaient les espèces comme le bouleau blanc, le sapin baumier, les épinettes ou le cèdre blanc pour leurs besoins de base avec des impacts relativement faible sur la composition forestière (Marchais, 2017). La colonisation eurocanadienne et l'exploitation forestière ont commencé vers 1912 (Vincent, 1995), conduisant à la coupe d'immenses forêts matures (Bergeron, 2000b). Des incendies liés à la prospection et à l'ouverture des terres (grands feux de 1910-1950) sont à l'origine de la plupart des massifs forestiers de l'Abitibi (Bergeron, 2000b). La découverte de gisement minier et la construction de la mine Noranda ont aussi provoqué un mouvement d'urbanisation intense (Paquin, 1979).

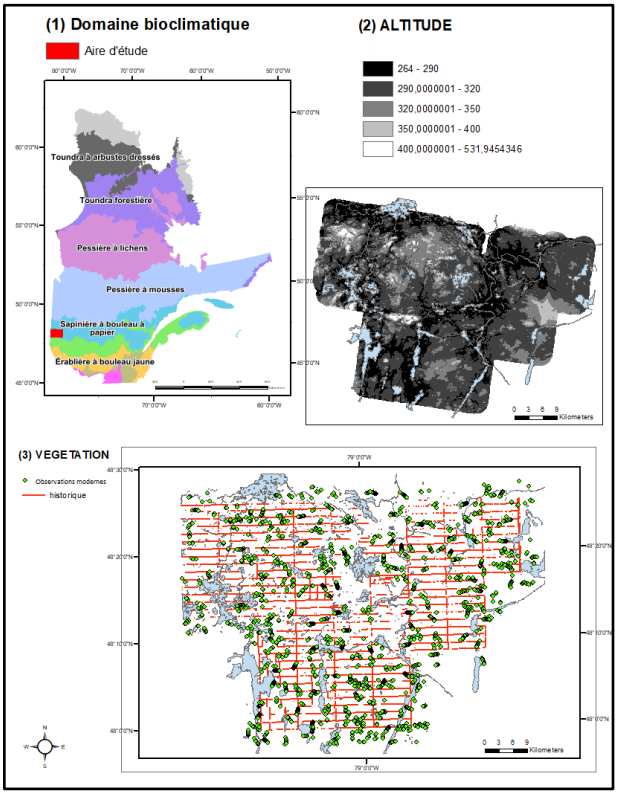

Figure 2.1 Présentation de l'aire d'étude (1), avec carte détaillée de l'altitude (2) et des observations d'arpentage et des placettes d'échantillonnage modernes (3)

2.3 Méthodes

2.3.1 Données préindustrielles

La composition des forêts préindustrielles a été documentée à partir des 38 rapports d'arpentage de cantons réalisés par différents arpenteurs entre 1920 et 1940 dans la région de Rouyn-Noranda. Les terres publiques étaient divisées en cantons d'environ 16 km sur 16 km et subdivisés en rangs parallèles de 1,6 km de large. Les arpentages de terrain ont été menés le long des limites du canton et des lignes de rangs. Les arpenteurs décrivaient et cartographiaient la végétation, les sols et l'occurrence des feux et des chablis afin d'identifier les meilleures terres disponibles pour la colonisation (Dupuis et al., 2011). Trois types d'observations concernant les forêts peuvent être trouvés dans ces archives (Dupuis et al., 2011) : des listes de taxons (ex : « pins, épinettes, merisier et quelques érables »), des types de couverts forestiers (ex. : « bois mixtes », « taillis »), ainsi que des observations de perturbation (ex. : « brûlé », « chablis »). La base de données historique a été constituée à partir des observations mentionnant au moins un taxon d'arbre, un type de couvert ou une perturbation. Pour toutes les observations mentionnant une liste de taxons, un rang a été attribué à chaque taxon en fonction de sa position dans la liste, en supposant que cette position reflète leur surface terrière relative, ce qui a été validé ailleurs avec des données indépendantes (Terrail et al., 2014). La première position dans la liste (c.-à-d., rang 1) signifie donc que le taxon était dominant en termes de surface terrière. De plus pour les données préindustrielles les arpenteurs avaient une attention moins importante pour les espèces non commerciales ainsi qu'aux arbres de petite taille et aux arbustes (Dupuis, 2011). À l'époque moderne seules les espèces de plus de 9 cm de dhp sont répertoriées bien que d'autres espèces soient aussi présentes, ainsi seules les espèces ayant un potentiel d'atteindre la taille de 9 cm de dhp ont été retenues pour les données préindustrielles également pour les données modernes dans la suite. Les données contenues dans les

archives d'arpentages ont été géoréférencées sous forme de lignes ou de points à partir des cartes cadastrales en utilisant les logiciels QGIS (version 3.16) et ArcGIS (version 10.7). Au total 2697 observations ont été enregistrées dans la base de données et précisément géoréférencées. Les espèces ont été rassemblées selon les 5 taxons les plus fréquents, à savoir: BOP (bouleau blanc); EPI (épinettes noires et blanches); PET (peuplier faux-tremble et baumier); PIN (pins blanc, rouge et gris); SAB (sapin baumier); THO (thuya occidental). La base de données comprend 2080 observations comportant au moins 1 de ces 6 taxons.

2.3.2 Données modernes

La composition moderne des forêts a été documentée avec les inventaires forestiers du ministère de la Forêt de la Faune et des Parcs (MFFP) des trois derniers décennaux (1980-2015 ; les inventaires du 5e décennal ne sont pas encore disponibles pour notre zone d'étude). Seules les placettes d'inventaire situées à une distance d'au moins 3,5 km des observations des arpenteurs ont été sélectionnées. Ces inventaires reposent sur un échantillonnage de placettes de 400 m^2, réparties aléatoirement dans un territoire stratifié par type de peuplements forestiers productifs cartographiés par photographie aérienne (le nombre de placettes dans chaque type de peuplements est déterminé en fonction de sa superficie relative). Dans chaque placette, le diamètre de toutes les tiges > 9 cm de DHP est mesuré. Les tiges sont identifiées au niveau de l'espèce, permettant ainsi de calculer une surface terrière par espèce par placette. Les espèces ont été regroupées par taxons et classées par rapport à leur surface terrière relative, de manière à obtenir des rangs d'abondance directement comparables à ceux rapportés dans les observations d'arpentage (Terrail et al., 2014). La base de données moderne est constituée de 2360 placettes dans notre zone d'étude pour la période de 1980-2010. Dans les données modernes, les taxons représentant < 5 % de la surface terrière totale de la placette ont été considérés comme absents.

2.4 Analyses

Pour les données préindustrielles et modernes, plusieurs indices ont été calculés pour chacun des 5 principaux taxons. Premièrement, la fréquence absolue correspond au nombre de fois qu'un taxon est mentionné dans les observations (quel que soit son rang d'abondance), divisé par le nombre total d'observations. Pour les observations d'arpentage, le calcul de la fréquence absolue a été pondéré par la longueur des observations géoréférencées en suivant la formule :

$$F(X) = \frac{L(X)}{L} \times 100$$

Où $F(X)$ est la fréquence absolue du taxon X, $L(X)$ la longueur totale des observations où le taxon X est mentionné et L la longueur totale de toutes les observations. Deuxièmement, une fréquence par rang a été calculée pour chaque taxon, qui correspond au nombre de fois ou un taxon est mentionné au rang r divisé par le nombre total d'observations où au moins r taxons sont mentionnés. Ce calcul a été pondéré par la longueur des observations d'arpentage géoréférencées en suivant la formule :

$$F(Xr) = \frac{L(Xr)}{Lr} \times 100$$

où $F(Xr)$ est la fréquence du taxon X au rang r, $L(Xr)$ est la longueur totale des observations où le taxon X est mentionné au rang r dans les listes de taxons et Lr la longueur totale des observations où au moins r taxons sont mentionnés.

La fréquence absolue et les fréquences aux quatre premiers rangs ont été calculées pour l'ensemble de la région d'étude. La fréquence absolue a aussi été calculée par grand type de dépôts de surface (argileux, glaciaire, fluvioglaciaire, rocheux et organiques)

en superposant la localisation des données historiques et modernes sur les cartes de dépôts contenues dans les cartes écoforestières du MFFP (MFFP, 2018). Finalement, de manière à cartographier les changements de composition, la fréquence absolue des taxons a été calculée pour des cellules des 5 km par 5 km (c.-à-d.. , 25 km^2). Ces fréquences absolues ont ensuite été transformées en fréquences relatives en divisant la fréquence absolue du taxon par la somme totale des fréquences absolues de l'ensemble des taxons. Ainsi, la somme de fréquences relatives de l'ensemble des taxons donne 100 % pour une cellule. Cette méthode a été retenue puisque les mesures relatives sont considérées comme plus précises que les fréquences absolues à l'échelle de cellules (Terrail et al., 2014). Pour chaque époque séparément, seules les cellules comportant au moins 5 observations à l'époque cartographiée (historique ou moderne) ont été retenues. De même, seules les cellules comportant au moins 5 observations aux deux époques ont été retenues pour calculer les cartes de changements de fréquence relative.

2.5 Historique des perturbations

De manière à expliquer les changements de composition documentés par les archives d'arpentage, l'historique des perturbations de la région a été reconstitué à partir de différentes sources de données. La distribution des temps depuis feux a été documentée à partir des travaux précédents basés sur un ensemble de données (photo-aériennes, archives historiques et données dendrochronologiques; Bergeron et al., 2004). Les mentions de feux dans les données d'arpentage (c.a.d; « brûlé », « vieux brulé ») ont également été cartographiées. L'historique des coupes et autres perturbations plus récentes a été reconstitué à partir des données disponibles dans les cartes écoforestières du dernier décennal (MFFP, 2020).

CHAPITRE III

RÉSULTATS

À l'époque préindustrielle (1909-1940) le taxon "épinette" était le plus fréquent (85,5 %) et le plus dominant (63,9 % ; Tableau 3.1), et tendait à être présent sur l'ensemble du territoire (Figure 3.4) et des types de dépôts de surface (figure 3.1). Le bouleau blanc et le sapin étaient également des taxons très fréquents (66,5 % et 60 %, respectivement ; Tableau 3.1), mais n'étaient que très rarement dominants (Tableau 3.1). Le peuplier faux-tremble était moins fréquent (29,9 % ; Tableau 3.1), mais était presque systématiquement dominant quand il était présent (Tableau 3.1). Les peupliers étaient plus fréquents dans la portion centrale du territoire aux alentours de la ville de Rouyn-Noranda (Figure 3.1). Le thuya et les pins étaient moins fréquents (18,3 % et 5,2 %, respectivement) et très rarement dominants (Tableau 3.1). Les pins étaient particulièrement fréquents sur les dépôts fluvio-glaciaires et dans une moindre mesure sur les dépôts rocheux (figure 3.1).

Entre les époques préindustrielle et moderne, les peupliers représentent le taxon ayant le plus augmenté en fréquence absolue (+ 28 %) et en dominance (+ 13 % ; Tableau 3.1). La fréquence a particulièrement augmenté sur les dépôts argileux (Figure 3.1) et dans la portion centrale de la région d'étude (Figure 3.4). Le bouleau blanc a légèrement diminué en fréquence (- 8,9 %), mais est aujourd'hui plus dominant qu'à l'époque préindustrielle (+ 16,6 % ; Tableau 3.1). À l'inverse, les épinettes ont vu leur fréquence et leur dominance diminuer, respectivement de- 39,2 % et – 41,7 % (Tableau 3.1) de sorte que maintenant elles tendent à être codominantes plutôt que dominantes.

Les dépôts organiques semblent être les sites ou les épinettes se sont les mieux maintenues (Figure 3.1). La fréquence du sapin a diminué de – 25,3 % pour l'ensemble de la région d'étude (Tableau 3.1) et sur l'ensemble des types de dépôts de surface (Figure 3.1). La fréquence relative du sapin semble surtout avoir diminué dans la portion centrale de la région d'étude (Figure 3.4). Les pins ont connu une faible diminution de fréquence absolue (- 7,2 %), mais leur fréquence a augmenté sur les dépôts rocheux (+ 14,5 % ; Figure 3.1). Le thuya a diminué en fréquence sur les dépôts glaciaire et fluvioglaciaire (Figure 3.1).

À l'époque préindustrielle, les lignes d'arpentage qui traversaient des milieux rocheux étaient largement dominées par les épinettes, le sapin et le bouleau blanc, et dans une moindre mesure les peupliers et le pin gris (Figure 3.1). En comparaison avec les cartes écoforestières (Figure 3.1), ces mêmes lignes semblent aujourd'hui être occupées par une composition similaire à l'époque préindustrielle avec une dominance de l'épinette noire et du bouleau à papier, cependant le pin gris y est aujourd'hui plus abondant que le sapin.

L'analyse de l'historique des perturbations montre que plus de 40% de la zone d'étude a brulé depuis 1900 (Figure 3.2 et 3.3). D'importantes zones brulées ont d'ailleurs été observées par les arpenteurs entre 1920 et 1940, qui correspondaient vraisemblablement à des feux du début du XX^{e} siècle et de la fin du XIX^{e} siècle. De plus, près de 20% de la zone d'étude a été soumise à des coupes industrielles (c.a.d, coupes à blanc) depuis les années 1970 (Figure 3.3). Les données modernes ont montré que plusieurs zones ont changé de vocation, on remarque dans l'ensemble 8 % du territoire qui sont identifiés comme des milieux fortement perturbés par l'activité humaine contre 11 % en terrain agricole (Figure 3.2).

Tableau 3.1 Fréquence absolue et fréquence par rang des taxons pour les périodes préindustrielle (1909-1940) et moderne (1980-2015). Une forte fréquence au premier rang (R1) indique que le taxon tendait à être dominant dans les peuplements tandis que les fréquences aux rangs 2 à 4 indiquent que les taxons tendaient à être codominant ou qu'ils étaient présents comme espèces compagnes dans les peuplements.

	Période préindustrielle (1909-1940)					Moderne (1980-2015)				
Taxons	Freq. absolue	R 1	R 2	R 3	R 4	Freq. absolue	R 1	R 2	R 3	R 4
EPI	89,5	63,9	29,2	2,3	0,4	50,3	22,2	20,2	23,1	19,5
BOP	66,5	3	16,1	60,5	54,2	57,6	19,6	33,1	23,7	15,2
SAB	60	3,4	49,4	25,8	0,1	34,7	7,7	17,8	24,3	23,3
PET	29,9	27,8	0,2	0,5	5,4	58,2	40,8	13,7	11,2	15,2
PIN	18,3	1,6	4	7,7	26,6	11,1	5	4,6	3,8	7,3
THO	5,2	0,1	0,7	2,1	11,1	2,3	1,1	0,8	1,1	1
Autres	2,2	0,3	0,4	1	2,3	19,2	3,5	9,9	12,8	18,5

Autres à l'époque préindustrielle : Aulne, Mélèze, Frêne, Cormier, Framboisier, Merisier, Erable Batard, Coudrier, Saule, Érable de Montagne.

Autres à l'époque moderne (par ordre d'importance) : Mélèze, Érable rouge, Frêne noir, Aulnes, Saules, Bouleau jaune, Érable à épis.

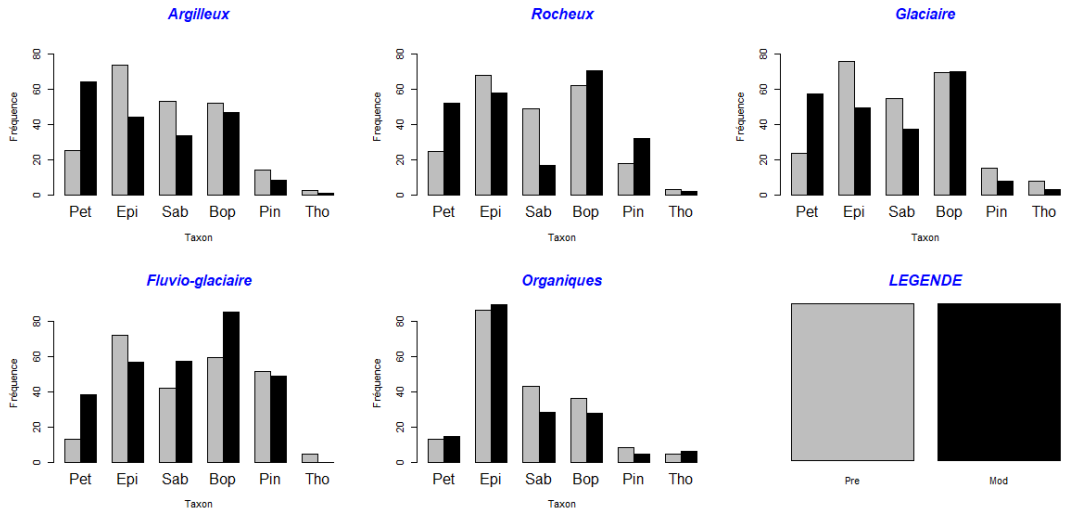

Figure 3.1 Changements de composition selon les types de dépôts de surface. Pour chaque taxon : "pré." et "mod." indiquent respectivement la fréquence absolue de ce taxon aux époques préindustrielle et moderne.

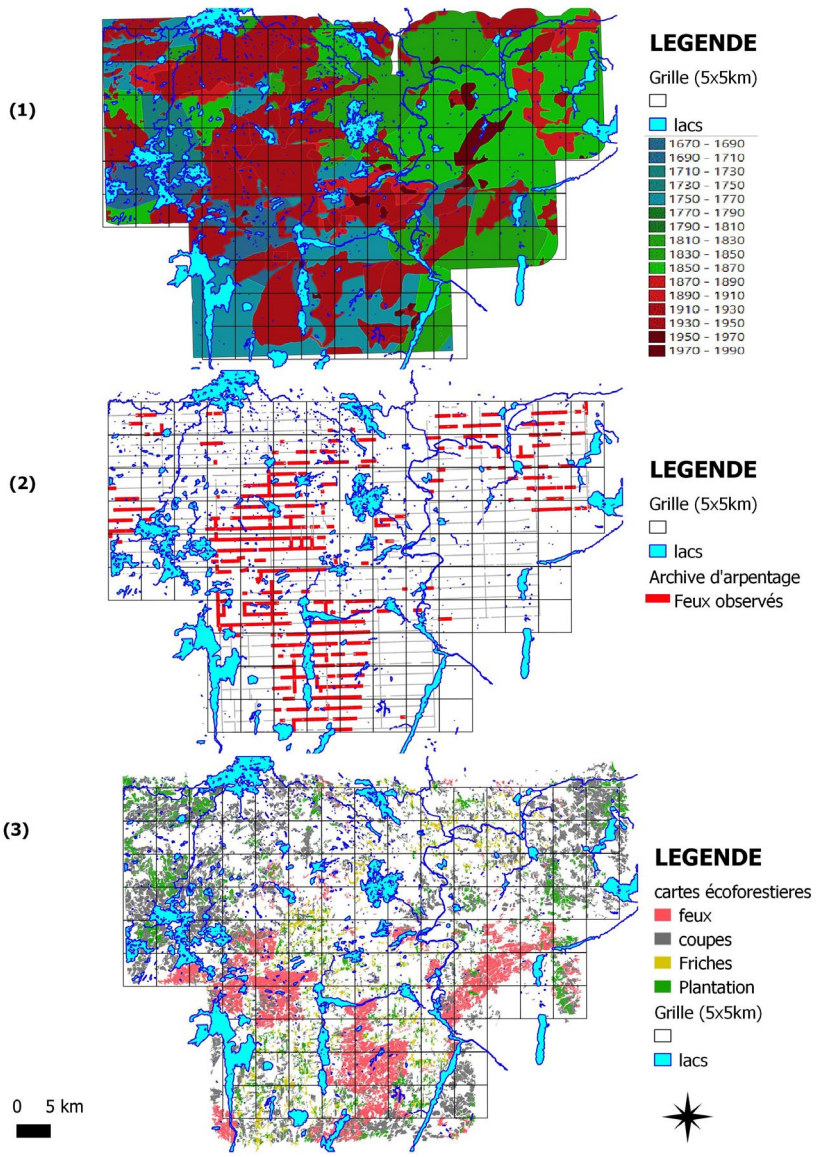

Figure 3.2 Comparaison entre la distribution spatiale des temps depuis les derniers feux dans l'aire d'étude (1; d'après Bergeron et al., 2004) et les feux préindustriels observés par les arpenteurs au XXe siècle (2) ainsi que la distribution des perturbations identifiées dans les cartes écoforestières (3). Une majorité des forêts a brulé au cours de la période 1910-1930, et le reste est issu de feux plus anciens (1700-1850)

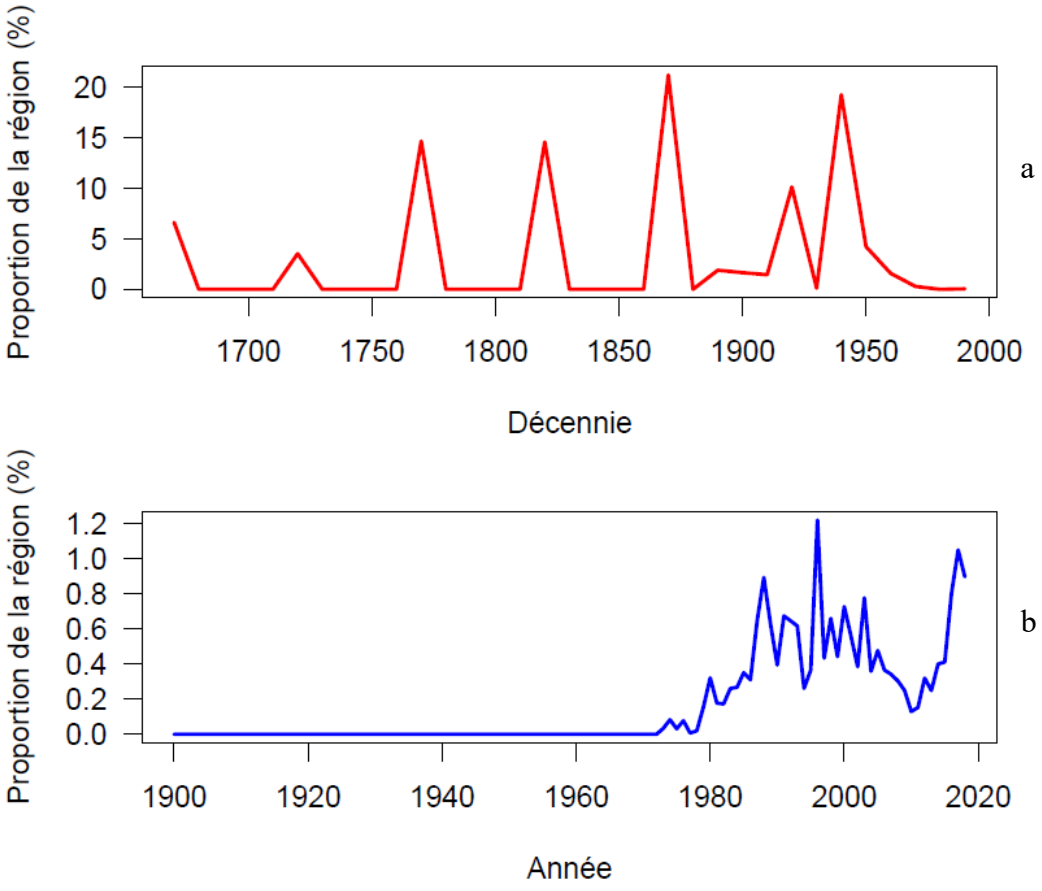

Figure 3.3 (a) Distribution par décennie, des temps depuis feux dans la région d'étude d'après Bergeron et al., 2004 et (b) évolution des surfaces coupées par année d'après les cartes écoforestières. Ces courbes sont basées sur les données montrées dans les cartes de la figure 3.2. Bien que les historiques de coupe contenus dans les cartes écoforestières ne remontent pas plus loin que les années 1970, des coupes plus anciennes ont aussi vraisemblablement eu lieu dans la région avant cette période (Lienert, 1966).

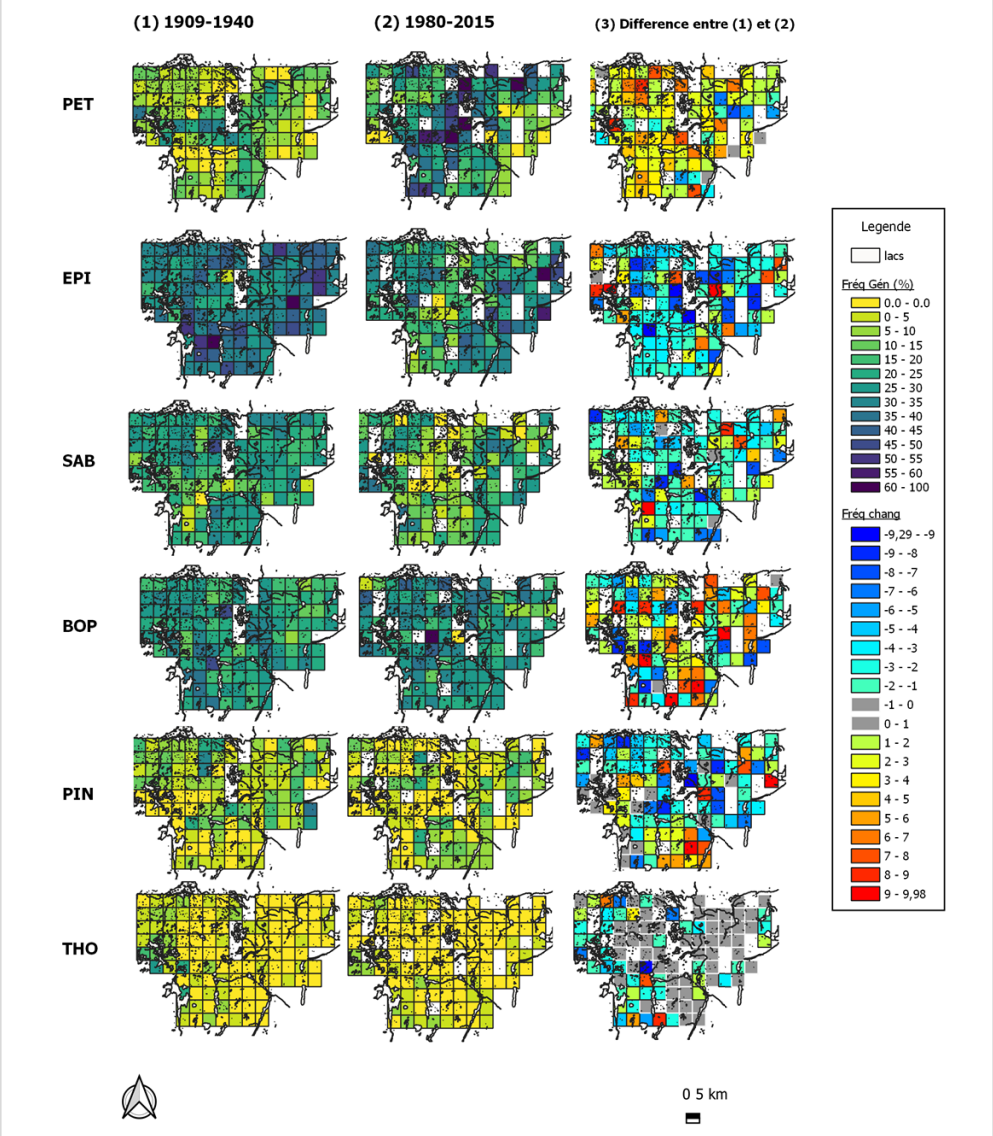

Figure 3.4 Cartes des fréquences relatives des principaux taxons aux époques préindustrielle (colonne 1), moderne (colonne 2) et cartes des changements de fréquence relative (colonne 3). Dans les colonnes 1 et 2, la couleur jaune indique que le taxon était absent de la cellule dans la colonne 3 une différence positive indique que le taxon est plus fréquent à la période moderne qu'à la période préindustrielle. Les cellules contenant moins de 5 observations aux époques préindustrielle ou moderne ont été retirées des analyses.

CHAPITRE IV

DISCUSSION

Les travaux antérieurs réalisés sur les forêts préindustrielles des régions adjacentes (Danneyrolles et al., 2016; Marchais, 2017) nous avaient permis de poser comme hypothèses que les forêts de la région de Rouyn-Noranda étaient dominées par des essences résineuses (épinettes, sapin, pins) à l'époque préindustrielle. Suite à la colonisation et l'industrialisation de la région, on s'attendait à observer une diminution des essences résineuses et une forte augmentation des feuillus de début de succession (dont principalement le peuplier faux-tremble aujourd'hui abondant dans la région). Les résultats décrits plus hauts permettent largement de confirmer ces hypothèses.

4.1 Limitation des archives d'arpentages

Les archives d'arpentages ont été largement utilisées pour reconstituer les forêts anciennes, toute fois cette utilisation comporte des nombreuses limites qui sont également applicables à cette étude. Premièrement le but de l'arpentage n'était pas celui de décrire la composition des forêts, mais plutôt de diviser les terres en cantons ainsi la qualité des informations écrites est très variable d'un arpenteur à l'autre (Laflamme, 2012). Les observations des arpenteurs ne fournissent de l'information que pour le moment de l'arpentage, sans intégrer la variabilité temporelle de l'occurrence des perturbations (Zhang et al., 1999). Certains arpentages étaient pratiqués en hiver ce qui a dû compliquer l'identification des espèces décidues, d'autres encore étaient réalisés après une coupe forestière affectant ainsi la qualité des observations (Dupuis,

2009; Suffling et al., 2003). Hormis ces limites s'ajoute également le contexte actuel des changements climatiques une utilisation « stricte » des caractéristiques d'écosystèmes du passé comme états de référence pourrait aboutir à des écosystèmes forestiers non viables dans le futur avec des environnements qui changeront dans l'avenir (Choi et al., 2008; Danneyrolles, 2016). Malgré ces inconvénients, les archives d'arpentage sont considérées comme la meilleure source d'information pour évaluer la composition et la distribution des forêts préindustrielles en Amérique du Nord (Whitney, 1994).

4.2 Composition des forêts préindustrielles

Les résultats montrent que les forêts préindustrielles étaient largement dominées par les épinettes, qui étaient présentes dans presque toutes les observations (90%) et très souvent accompagnées du sapin et du bouleau blanc. Des compositions très similaires à l'époque préindustrielle ont été rapportées dans les forêts adjacentes du nord du Témiscamingue (Danneyrolles et al., 2016), de l'Abitibi (Marchais, 2017) et de l'Ontario (Pinto et al., 2008). Plus à l'est du Québec, les forêts préindustrielles de la chaine des Appalaches témoignaient aussi d'une composition comparable à celle décrite ici (Dupuis et al., 2011 ; Fortin, 2018).

Les épinettes dominantes à l'époque préindustrielles étaient vraisemblablement des épinettes noires, puisque ce taxon est aujourd'hui le plus abondant dans la région d'étude. Un tel paysage dominé par l'épinette noire pourrait être du à une fréquence relativement élevée des feux durant le Petit Âge glaciaire (approx. 1250-1850AD ; Drobyshev et al., 2017). En effet, les épinettes noires ont des cônes semi-serotineux qui assurent généralement une bonne pluie de graines après le passage du feu (Viereck et Johnston, 1990), de sorte que l'espèce peut se rétablir dans les paysages brulés

(Bouchard et al., 2008 ; Cyr et al., 2012). La forte présence du bouleau blanc (favorisé par les feux) et la très faible dominance du sapin baumier (sensible aux feux) tendent à supporter cette interprétation. La forte dominance de l'épinette noire accompagnée du bouleau blanc, par rapport à la région du lac duparquet plus au Nord (Marchais, 2017), pourrait être due à la plus forte abondance des dépôts glaciaires qui leur sont favorables.

À l'époque préindustrielle, les peupliers étaient peu fréquents, localisés dans des secteurs précis et presque systématiquement dominant quand ils étaient présents. Bien que les archives historiques ne permettent pas de déterminer les espèces de peupliers, il semble qu'ils s'agissent principalement du peuplier faux-tremble qui est aujourd'hui le peuplier le plus abondant dans la région d'étude. Ces plaques de paysage dominées par les peupliers représentaient très certainement des secteurs brulés avant le passage des arpenteurs. En effet, le peuplier est une espèce de début de succession dont la multiplication végétative et la croissance rapide lui permettent souvent de dominer les peuplements dans les premières décennies après le passage du feu (Brown et DeByle, 1987; Dansereau et Bergeron, 1993 ; Bergeron et Dubuc, 1989; Paré et al., 1993). Les archives d'arpentages comportent de nombreuses observations décrivant des zones brulées qui montrent que de nombreux feux avaient affecté la région entre les années 1900 et le passage des arpenteurs (Figure 3.2). Une forte activité des feux au cours de cette période dans la région d'étude a été documentée par des études précédentes (Bergeron, 2000a ; Danneyrolles et al., 2021).

Les pins (rouge, blanc et gris) étaient particulièrement fréquents sur les dépôts fluvioglaciaires et les affleurements rocheux à l'époque préindustrielle. Bien que ces dépôts soient souvent plus secs et moins productifs que les autres (Béland et Bergeron, 1996), ils représentent généralement des sites sur lesquels les pins sont plus complétifs que la plupart des autres taxons étudiés.

4.3 Changements de composition entre les époques préindustrielle et moderne

Entre les époques préindustrielle et moderne, d'importants changements sont survenus dans la composition forestière de la zone d'étude, avec une forte augmentation de la dominance des peupliers et une diminution des épinettes. Des changements très similaires ont été enregistrés dans les forêts boréales et tempérées nordiques du Québec et de l'Ontario (Pinto et al., 2008 ; Dupuis et al., 2011 ; Danneyrolles et al., 2016 ; Marchais, 2017 ; Fortin, 2018).

Les peupliers représentent le taxon ayant le plus augmenté, autant en fréquence qu'en dominance. Comme les données modernes permettent de différencier les espèces des peupliers, il est évident que cette augmentation a surtout concerné le peuplier faux-tremble. Comme expliqué plus haut, le peuplier est largement favorisé par les feux. La forte activité de feux pendant la période de colonisation dans cette aire d'étude (Figure 3.2) est donc vraisemblablement la principale cause de l'augmentation des peupliers. Cependant, le peuplier est aussi largement favorisé par d'autres perturbations sévères comme les coupes à blanc. Il se régénère également très bien sur les friches agricoles. À l'arrivée des premiers colons dans cette région, ces types de perturbations et d'historiques d'usage des sols ont été abondants puisque les colons défrichaient les terres pour l'agriculture et récoltaient le bois pour leurs constructions (Figure 3.2). Il est donc vraisemblable que ces différents facteurs aient contribué ensemble à l'augmentation des peupliers. Cette augmentation a aussi été particulièrement marquée dans les sites argileux. On sait d'ailleurs que le peuplier faux-tremble se retrouve souvent en abondance sur les dépôts riches, fins et bien drainés, même s'il peut se développer sur les sols de toutes textures (Brumelis et Carleton, 1988 ; Chen et al., 2002).

Les épinettes ont diminué dans l'ensemble de la zone d'étude, sur tous les types de dépôts de surface. L'hypothèse développée plus haut est qu'à l'époque préindustrielle, les épinettes noires étaient abondantes à cause de leur capacité à se régénérer après les feux. Cette hypothèse peut sembler contredire le fait que les feux ont été fréquents durant le XX^{e} siècle. Cependant, la fréquence élevée des feux au début du siècle s'est additionnée à des perturbations humaines antérieures qui auraient pu très sévèrement réduire les arbres semenciers dans les populations d'épinette. Plus particulièrement, la récolte de bois par les colons visaient particulièrement les épinettes pour la construction. Les coupes industrielles du début du siècle pour l'industrie du papier ciblaient aussi principalement les épinettes (Lienert, 1966). En l'absence d'épinettes noires semencières dans les peuplements, il semble logique que le peuplier faux-tremble et le bouleau blanc soient devenus dominants grâce à leur mode de multiplication végétative (Laquerre et al., 2011 et Laquerre et al., 2009) et à leur grand pouvoir de dispersion.

De la même manière que l'épinette, les pins ont diminué sur les dépôts glaciaires et argileux, surement suite aux coupes forestières qui visaient aussi particulièrement ce taxon au début du XX^{e} siècle. Inversement, les pins tendent à avoir augmenté sur les dépôts rocheux. Les pins, et particulièrement le pin gris, ont une bonne capacité de reproduction suite aux incendies grâce à des cônes sérotineux (Nguema, 2019). Il est possible que les feux aient permis aux pins de se maintenir et même d'augmenter sur les sites rocheux où ils sont généralement plus compétitifs que les autres espèces. Le pin gris peut résister aux feux sévères qui sont plus fréquents sur les sites rocheux par rapport au paysage environnant, où les feux sont souvent d'intensité plus faible.

Le Sapin a diminué sensiblement sur l'ensemble de l'aire d'étude, mais devient plus dominant entre les deux périodes (Tableau 3.1). Cela peut se justifier par le régime des

perturbations précoloniales qui était probablement dominé par des perturbations secondaires comme des épidémies d'insectes (Lorimer, 1977). On sait que des zones forestières ont été gravement touchées par les épidémies de TBE (Navarro et al., 2018) et qu'elles favorisent le développement des espèces tolérantes à l'ombre à l'exemple du sapin baumier (Morin, 1994 ; Morin et Laprise, 1997) ainsi l'épidémie de TBE des années 10-20 à contribuer surement à la diminution de sa fréquence en plus de celle des années 40-50 qui ont probablement pu réduire l'abondance du sapin et favoriser la dominance des feuillus comme le bouleau blanc (Tableau 3.1).

4.4 Applications pour l'aménagement forestier écosystémique

Notre étude aide à décrire un état de référence pour l'aménagement écosystémique. L'aire d'étude a subi une transformation de sa composition forestière entre les périodes préindustrielles et modernes avec une forte augmentation du peuplier et une diminution des épinettes. Ces changements semblent principalement être attribués aux feux et aux coupes forestières du XXe siècle. Dans la mesure où une importante proportion de feu du XXe siècle a été provoquée par des fluctuations climatiques (Danneyrolles et al., 2021), une partie des changements de composition n'est pas directement liée aux activités humaines, mais sont plutôt amplifiés en présence de ces deux perturbations (activités humaines et changement climatique). Cependant une partie du couvert forestier présent à l'époque préindustrielle pourrait être restauré au travers de l'aménagement écosystémique. Pour restaurer une composition plus proche de celle observée dans les forêts préindustrielles, il faudrait favoriser les épinettes à la place des peupliers. Ainsi la gestion forestière (aménagement écosystémique) pourrait viser une plus grande dominance des conifères. Des coupes partielles dans les peuplements mixtes à dominance feuillue pourraient être utilisées pour augmenter la proportion des résineux (Prevost et al., 2010 ; Bose et al., 2014) et à réduire la composante feuillue

des peuplements en favorisant la régénération des résineux. De plus, l'utilisation de telles pratiques sylvicoles qui réduisent l'ouverture de la canopée permet de limiter le retour massif du peuplier faux-tremble après coupes (Nguema, 2019). À l'absence des résineux, nous suggérons l'établissement des plantations de sous couvert après ces coupes partielles.

CONCLUSION

Cette étude a permis de documenter la composition des forêts préindustrielles et le changement survenu depuis dans la forêt boréale mixte de la MRC de Rouyn-Noranda. Nos résultats décrivent des changements d'une forêt à dominance résineuse dont principalement les épinettes, vers une forêt actuelle dominée par les feuillus de début de succession dont principalement le peuplier faux-tremble. Les feux et les activités liées à la colonisation (l'exploitation forestière, agriculture) semblent être les principales causes de ces changements. Les changements de composition se sont aussi structurés selon les grandes classes de dépôts de surface. De prochains travaux basés sur l'analyse de photographies aériennes anciennes permettraient de mieux comprendre ces phénomènes, notamment en lien avec les effets des feux et des dépôts atmosphériques acides. Plus généralement, ces résultats ont permis de dresser le portrait des forêts préindustrielles et d'établir un état de référence pour l'aménagement écosystémique dans la région de Rouyn-Noranda. Les travaux d'aménagement écosystémique devront viser le retour de la composante résineuse et limiter l'expansion du peuplier faux- tremble. Avec les effets des changements climatiques prévus pour les prochaines décennies et les modifications des régimes de perturbations naturelles, un retour à la composition des forêts préindustrielles « sens strict » pourrait aboutir à mettre en place des écosystèmes non adaptés aux nouvelles conditions environnementales. La promotion de peuplements mixtes, diversifiés et comportant différentes espèces d'épinettes (épinettes noires et blanches) associées à des espèces plus tempérées (par ex. : thuya, bouleau jaune) pourrait permettre d'assurer une certaine résilience des forêts aux changements futurs.

ANNEXE A

CHANGEMENTS DE COMPOSITION SELON LES TYPES DE DÉPÔTS DE SURFACE

Changements de composition selon les types de dépôts de surface. Pour chaque taxon, les colonnes "pré." et "mod." indiquent respectivement la fréquence absolue de ce taxon aux époques préindustrielle et moderne. La colonne "BRULÉ" indique la fréquence d'observations identifiées comme brulées dans la base de données historiques.

	PET		**EPI**		**SAB**		**BOP**		**PIN**		**THO**		**BRULÉ**
Dépôts	**pré.**	**mod.**	**pré.**	**mod.**	**pré.**	**mod.**	**pré.**	**mod.**	**pré.**	**mod.**	**pré.**	**mod.**	**pré.**
1 Glaciaire	23,9	57,4	76,2	49,5	55,1	37,5	69,8	70,0	15,3	7,9	8,3	3,1	20,6
2 Fluvio-glaciaire	12,9	38,3	71,9	56,9	42,3	57,3	59,2	85,4	51,5	48,8	4,5	0,0	23,1
4 Argilleux	25,4	64,4	73,7	44,5	53,4	33,7	52,1	46,9	14,3	8,6	2,9	1,0	26,6
7 Organique	13,1	14,8	86,4	89,3	43,0	28,6	36,4	27,8	8,4	4,9	4,8	6,2	15,7
R Rocheux	25,0	52,2	68,3	58,2	49,1	16,9	62,2	70,6	18,0	32,5	3,4	2,1	31,5

BIBLIOGRAPHIE

Asselin, H., Belleau, A. & Bergeron, Y. 2005, Factors responsible for the co-occurrence of forested and unforested rock outcrops in the boreal forest Landscape Ecology (2006) 21:271–280 DOI 10.1007/s10980-005-1393-1

Beland, M., & Bergeron, Y. 1996. Height growth of jack pine (Pinus hanksiana) in relation to site types in boreal forests of Abitibi, Quebec. Canadian journal of forest research, 26(12), 2170-2179.

Bergeron, Y. & Dubuc, M. 1989. Succession in the southern part of the Canadian boreal forest. Vegetation 79: 51-63.

Bergeron, Y. 2000 (a). Species and stand dynamics in the mixed woods of Quebec's southern boreal forest. Ecology 81(6) : 1500–1516. doi:10.1890/0012-9658(2000)081[1500:SASDIT]2.0.CO;2.

Bergeron, Y., & Charron, D. 1994. Postfire stand dynamics in a southern boreal forest (Québec): a dendroecological approach. Ecoscience 1(2): 173–184.

Bergeron, Y., 2000 (b). Une histoire de la végétation de l'Abitibi. In : Abitibi-Témiscamingue : de l'emprise des glaces à un foisonnement d'eau et de vie : 10 000 ans d'histoire. Les Editions MultiMondes.

Bergeron, Y., Gauthier, S., Flannigan, M., & Kafka, V. 2004. Fire regimes at the transition between mixed wood and coniferous boreal forest in northwestern Quebec. Ecology 85: 1916–1932.

Bose, A. 2014. Réponse des peuplements et des arbres à la coupe partielle en forêt boréale mixte de l'est du Canada – approches expérimentale et de modélisation. (Thèse de doctorat). Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Repéré dans Depositum à https://depositum.uqat.ca/id/eprint/621

Bose, A.K., Harvey, B.D. & Brais, S. 2014. Sapling recruitment and mortality dynamics following partial harvesting in aspen-dominated mixed woods in eastern Canada. Forest Ecology and Management 329: 37-48.

Bouchard, M., Kneeshaw, D., & Bergeron, Y. 2006. Forest dynamics after successive spruce budworm outbreaks in mixed wood forests. Ecology 87(9): 2319–2329. doi:10.1890/0012-9658(2006)87[2319:FDASSB]2.0.CO;2.

Bouchard, M., Pothier, D., & Gauthier, S. 2008. Fire return intervals and tree species succession in the North Shore region of eastern Quebec. Canadian Journal of Forest Research 38: 1621–1633.

Boucher, Y., Arseneault, D., Sirois, L., Blais, L., 2009. Logging pattern and landscape changes over the last century at the boreal et deciduous forest transition in Eastern Canada. Landsc. Ecol. 24, 171–184. https://doi.org/10.1007/s10980-008-9294-8

Boulanger, Y & Arseneault, D. 2004. Spruce budworm outbreaks in eastern Quebec over the last 450 years. Canadian Journal of Forest Research 34(5): 1035–1043. doi:10.1139/x03-269.

Brandt, J. P., Flannigan, M. D., Maynard, D. G., Thompson, I. D. & Volney, W. J. A. 2013. An introduction to Canada's boreal zone: ecosystem processes, health, sustainability, et environmental issues. Environmental Reviews, 21, p.207-226.

Brassard, B.W., Chen, H.Y.H., 2006. Stand structural dynamics of North American boreal forests. Crit. Rev. Plant Sei. 25, 115-137. 10.1080/07352680500348857

Brown, J. K. et DeByle, N. V. 1987. Fire damage, mortality, et suckering in aspen. Can. J. For. Res. 17: 1100-1109.

Brumelis, G. et Carleton, T. J. 1988. The vegetation of postlogged black spruce lowlands in central Canada. 1. Trees and tall shrubs. Can. J. For. Res. 18: 1470-1478.

Burton, P. J. 2010. in Forests and Society – Responding to Global Drivers of Change, G. Mery et al., Eds. (International Union of Forest Research Organizations, Vienna, Austria, , pp. 249–282. https://www.iufro.org/science/special/wfse/forests-society-global-drivers/

Chen, H. Y. H., Krestov, P. V. et Klinka, K. 2002. Trembling aspen site index in relation to environmental measures of site quality at two spatial scales. Can. J. For. Res. 32: 112-119

Choi, Y.D., Temperton, V.M., Allen, E.B., Grootjans, A.P., Halassy, M., Hobbs, R.J., Naeth, M.A., & Torok, K. 2008. Ecological restoration for future sustainability in a changing environment. Ecoscience 15: 53–64.

Cogbill, C.V., Burk, J., et 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.

Cooke, B.J., and Lorenzetti, F. (2006). The dynamics of forest tent caterpillar outbreaks in Québec, Canada. Forest Ecology and Management 226(1–3): 110–121. doi:10.1016/j.foreco.2006.01.034.

Cyr, D., Gauthier, S., & Bergeron, Y. 2012. The influence of landscape-level heterogeneity in fire frequency on canopy composition in the boreal forest of eastern Canada (V. Pillar, Ed.). Journal of Vegetation Science 23: 140–150.

Danneyrolles, V., Arseneault, D., Bergeron, Y., 2016. Pre-industrial landscape composition patterns and post-industrial changes at the temperate-boreal forest interface in western Quebec, Canada. J. Veg. Sci. 27, 470–481. https://doi.org/10.1111/jvs.12373

Danneyrolles, V., Cyr, D., Girardin, M.P., Gauthier, S., Asselin, H., & Bergeron, Y. 2021. Influences of climate fluctuations on northeastern North America's burned areas largely outweigh those of European settlement since AD 1850. *Environmental Research Letters* 16: 114007.

Danneyrolles, V., Dupuis, S., Fortin, G., Leroyer, M., de Römer, A., Terrail, R., Vellend, M., Boucher, Y., Laflamme, J., Bergeron, Y., Arseneault, D., 2019. Stronger influence of anthropogenic disturbance than climate change on century-scale compositional changes in northern forests. Nature Communications 10, 1265. https://doi.org/10.1038/s41467-019-09265-z

Dansereau, P.-R. et Bergeron, Y. 1993. Fire history in the southern boreal forest of northwestern Québec. Can. J. For. Res. 23: 25-32.

Delcourt, P.A., Delcourt, H.R., 2004. Prehistoric native Americans and ecological change: human ecosystems in eastern North America since the Pleistocene. Cambridge University Press, Cambridge ; New York, N.Y.

Drobyshev, I., Bergeron, Y., Girardin, M.P., Gauthier, S., Ols, C., & Ojal., J. 2017. Strong Gradients in Forest Sensitivity to Climate Change Revealed by Dynamics of Forest Fire Cycles in the Post Little Ice Age Era. Journal of Geophysical Research 122: 2605–2616.

Dufour, F. M., A.M. Hattenberger & F. Rodhain. 2008. Changements globaux : impact, gestion, approche du risque et mesures de santé – le cas de l'Europe. Rev. sci. tech. Off. int. Epiz, 2(2), 529-550. https://pdfs.semanticscholar.org/6b10/024f2f0d5405537625b23194f3bea4b4ad82.pdf

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. J. Veg. Sci. 22, 564–575. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01282.x

Egan, D., and Howell, E.A. 2001. The historical ecology handbook: a restorationist's guide to reference ecosystems. Island Press, Washington, D.C.

Ellis, E. C., Klein Goldewijk, K., Siebert, S., Lightman, D., & Ramankutty, N. 2010. Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. Global ecology and biogeography, 19(5), 589-606. https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00540.x

Environnement Canada. 2021. « Données climatiques ». https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_stations_f.html?timeframe=1&Prov=QC&StationID=50090&hlyRange=2012-12-03%7C2012-12-08&Year=2012&Month=12&Day=3&StartYear=1840&EndYear=2020&searchType=stnProx&txtRadius=25&optProxType=navLink&txtLatDecDeg=48.206111111111&txtLongDecDeg=78.835555555556&optLimit=specDate&selRowPerPage=25&station=ROUYN-NORANDA+A [consulté le 01 septembre 2021].

Fortin, Gabriel., 2018. Transformation de la composition de la forêt de la péninsule gaspésienne au cours du XXe siècle. Thèse. Rimouski, Québec, Université du Québec à Rimouski, Département de biologie, chimie et géographie, 208 p.

Foster, D.R., Motzkin, G., & Slater, B. 1998. Land-Use History as Long-Term Broad-Scale Disturbance: Regional Forest Dynamics in Central New England. Ecosystems 1: 96–119.

Gauthier, S. 2009. Ecosystem management in the boreal forest. Presses de l'Université du Québec, Québec.

Gauthier, S., Bernier, P., Kuuluvainen, T., Shvidenko, A., & Schepaschenko, D. 2015. Boreal forest health and global change. Science (New York, N.Y.), 349, 819-822. doi:10.1126/science.aaa9092

GIEC. 2013. Changements climatiques 2013. Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH.pdf

Greene, D.F., Noël, J., Bergeron, Y., Rousseau, M., & Gauthier, S. 2004. Recruitment of Picea mariana , Pinus banksiana , and Populus tremuloides across a burn severity gradient following wildfire in the southern boreal forest of Quebec. Canadian Journal of Forest Research 34: 1845–1857.

Grenon, F., Jetté, J.-P., Leblanc, M., Québec (Province). Direction de l'environnement et de la protection des forêts, 2010. Manuel de référence pour l'aménagement écosystémique des forêts au Québec. URL: http://www.bibl.ulaval.ca/doelec/lc/S/Manuelecosystemique forets_Grenon.pdf

Hanes, C.C., Wang, X., Jain, P., Parisien, M.-A., Little, J.M., and Flannigan, M.D. 2019. Fire-regime changes in Canada over the last half century. Can. J. For. Res. 49(3): 256–269. doi:10.1139/cjfr-2018-0293.

Higgs, E., Falk, D.A., Guerrini, A., Hall, M., Harris, J., Hobbs, R.J., Jackson, S.T., Rhemtulla, J.M., and Throop, W. 2014. The changing role of history in restoration ecology. Frontiers in Ecology and the Environment 12(9): 499–506. doi:10.1890/110267.

Kneeshaw, D. Bergeron, Y. T. Kuuluvainen. 2011. Forest Ecosystem structure and dustubance dynamics across the circumboreal forest in The Sage Handbook of Biogeography, A. Millington, M. Blumler, U. Schickhoff, Eds. (Sage, London, 2011), pp. 262–278.

Lachance, Sarah-Claude. 2017. Développement d'une approche de planification systématique de la conservation des milieux humides et de la sauvagine : étude de cas en Abitibi-Témiscamingue. Mémoire. Rouyn-Noranda, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Biologie, 137 p.

Laflamme, J. (2012). Comparaisons 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. Thèse de doctorat

Laquerre, S., Harvey, B.D., and Leduc, A. 2011. Spatial analysis of response of trembling aspen patches to clearcutting in black spruce-dominated stands. The Forestry Chronicle 87(1): 77-85. doi: https://doi.org/10.5558/tfc87077-1

Laquerre, S., Leduc, A., & Harvey,. B. D. 2009. Augmentation du couvert en peuplier faux-tremble dans les pessières noires du nord-ouest du Québec après coupe totale, Écoscience, 16:4, 483-491, DOI: 10.2980/16-4-3252

Lefort P., Gauthier S., & Bergeron Y. 2003. The Influence of Fire Weather and Land Use on the Fire Activity of the Lake Abitibi Area, Eastern Canada. Forest Science, 49, 509–521.

Lienert, A. 1966. The story of the (Kipawa) Noranda woods division. Canadian Paper International., Rouyn-Noranda, Canada. Available from http://books.google.ca/books?id=wd7KtgAACAAJ

Lorimer, C.G., 1977. The Presettlement Forest and Natural Disturbance Cycle of Northeastern Maine. Ecology 58, 139–148.

Marchais, M., 2017. Les changements de composition dans la forêt boréale mixte de l'ouest du Québec depuis la colonisation euro-canadienne. Mémoire. Université du Québec Abitibi-Témiscamingue, 53 p.

Marchais, M., Arseneault, D., Bergeron, Y. 2020. Composition Changes in the Boreal Mixedwood Forest of Western Quebec Since Euro-Canadian Settlement. Frontiers in Ecology and Evolution, 8:126.

Munoz, S.E., Mladenoff, D.J., Schroeder, S., Williams, J.W., 2014. Defining the spatial patterns of historical land use associated with the indigenous societies of eastern North America. J. Biogeogr. 41, 2195–2210. https://doi.org/10.1111/jbi.12386

Navarro, L., Morin, H., Bergeron, Y., and Girona, M.M. 2018. Changes in Spatiotemporal Patterns of 20th Century Spruce Budworm Outbreaks in Eastern Canadian Boreal Forests. Front. Plant Sci. 9: 1905. doi:10.3389/fpls.2018.01905

Newbold, T., Hudson, L.N., Arnell, A.P., Contu, S., De Palma, A., Ferrier, S., Hill, S.L.L., Hoskins, A.J., Lysenko, I., Phillips, H.R.P., Burton, V.J., Chng, C.W.T., Emerson, S., Gao, D., Pask-Hale, G., Hutton, J., Jung, M., Sanchez-Ortiz, K., Simmons, B.I., Whitmee, S., Zhang, H., Scharlemann, J.P.W., Purvis, A., 2016. Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment. Science 353, 288–291. https://doi.org/10.1126/science.aaf2201

Nguema Allogo, F. 2019. Régénération naturelle après coupe partielle dans des peuplements mixtes à dominance de peuplier faux-tremble (Doctoral dissertation, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue).

Nowacki, G.J., Abrams, M.D., 2015. Is climate an important driver of post-European vegetation change in the Eastern United States? Global Change Biology 21, 314–334. https://doi.org/10.1111/gcb.12663

Paquin, Normand. 1979. Histoire de l'Abitibi-Témiscamingue. Cahiers du département d'histoire et de géographie. Collège du Nord-Ouest, Rouyn-Noranda. Repéré dans Depositum à https://depositum.uqat.ca/id/eprint/433

Paré, D., Bergeron, Y. & Camiré, C. 1993. Changes in the forest floor of canadian southern boreal forest after disturbance. J. Veg. Sei. 4: 811-818.

Perrette, G., Lorenzetti, F., Moulinier, J., & Bergeron, Y. 2014. Site factors contribute to aspen decline and stand vulnerability following a forest tent caterpillar outbreak in the Canadian Clay Belt. Forest Ecology and Management 323: 126–137. doi:10.1016/j.foreco.2014.03.013.

Pinto, F., Romaniuk, S., & Ferguson, M. 2008. Changes to preindustrial forest tree composition in central and northeastern Ontario, Canada. Canadian Journal of Forest Research 38: 1842–1854.

Prevost, M., Dumais, D. & Pothier, D. 2010. Growth and mortality following partial cutting in a trembling aspen-conifer stand: results after 10 years. Canadian Journal of Forest Research 40: 894-903.

Robitaille, A & Saucier, J.-P. 1998. Paysages régionaux du Québec méridional. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Québec.

Royer, A., Veillette, J., & Miron, F. 2000. Abitibi-Témiscamingue : de l'emprise des glaces à un foisonnement d'eau et de vie : 10 000 ans d'histoire. Les Editions MultiMondes.

Stambaugh, M. C., Marschall, J. M., Abadir, E. R., Jones, B. C., Brose, P. H., Dey, D. C., & Guyette, R. P. 2018. Wave of fire: an anthropogenic signal in historical fire regimes across central Pennsylvania, USA. Ecosphere, 9(5), e02222.

Suffling, R., Evans, M., et Perera, A. 2003. Presettlement forest in southern Ontario: ecosystems measured through a cultural prism. For. Chron. 79: 485-501.

Terrail, R , Morin-Rivat, J , de Lafontaine, G , Fortin, M-J , Arseneault, D . 2019. Effets des incendies de peuplement du 20e siècle sur la structure du paysage et la composition des forêts dans l'est du Québec, Canada . J Veg Sci . 2020 ; 31 : 40 - 52 . https://doi.org/10.1111/jvs.12832

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. J. Veg. Sci. 25, 691–702. https://doi.org/10.1111/jvs.12142

Thompson, D.G., Pitt, D.G., 2003. A review of Canadian forest vegetation management research and practice. Ann. For. Sei. 60, 559-572.

Trommetter, M., & Weber, J. 2004. Développement durable et changements globaux : le développement durable l'est-il encore pour longtemps. Biodiversité et changements globaux : enjeux de société et défis pour la recherche, ministère des Affaires Etrangères–ADPF, Paris, 136-152.

Viereck, L.A., & Johnston, W.F. 1990. Picea mariana (Mill.) B. S. P. Black Spruce. In Burns, R.M. & Honkala, B.H. (eds.), Silvics of North America, pp. 443–464. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Washington.

Vincent, O.F. 1995. Histoire de l'Abitibi-Témiscamingue. Institut québécois de recherche sur la culture, Québec, QC, CA.

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, xxxiv, 451 p.

Zhang, Q., Pregitzer, K.S., et Reed, D.D. 1999. Catastrophic disturbance in the presettlement forests of the Upper Peninsula of Michigan. Canadian Journal of Forest Research 29(1): 106-114.