

$$P'(t) = \frac{r}{k} P(t)(b - P(t))$$
$$V_{AE,ik} = \beta_1 d h p_{ik}^{\beta_2} H_{ik}^{\beta_3} + \varepsilon_{2,ik}$$



0 10 20 30 40 50 60 78 80 90 100

Utilisation couplée des archives d'arpentage et de la classification écologique pour affiner les cibles de composition dans l'aménagement écosystémique des forêts tempérées du Québec

par Victor Danneyrolles, Sébastien Dupuis, Yan Boucher, Jason Laflamme, Gabriel Fortin, Marie Leroyer, Raphaële Terrail, Yves Bergeron et Dominique Arseneault

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 183

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE

Utilisation couplée des archives d'arpentage et de la classification écologique pour affiner les cibles de composition dans l'aménagement écosystémique des forêts tempérées du Québec

par Victor Danneyrolles*, Sébastien Dupuis, Yan Boucher, Jason Laflamme, Gabriel Fortin, Marie Leroyer, Raphaële Terrail, Yves Bergeron et Dominique Arseneault

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 183

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE

* Auteur de correspondance : Victor.Danneyyrolles@uqat.ca

Mandat de la DRF

La Direction de la recherche forestière a pour mandat de participer activement à l'orientation de la recherche et à l'amélioration de la pratique forestière au Québec, dans un contexte d'aménagement forestier durable, en réalisant des travaux de recherche scientifique appliquée. Elle acquiert de nouvelles connaissances, du savoir-faire et du matériel biologique et contribue à leur diffusion ou à leur intégration au domaine de la pratique. Elle subventionne aussi des recherches en milieu universitaire, le plus souvent dans des créneaux complémentaires à ses propres travaux.

Les mémoires de recherche forestière de la DRF

Depuis 1970, chacun des Mémoires de recherche forestière de la DRF est révisé par au moins trois pairs indépendants. Cette publication est produite et diffusée à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation d'un projet ou d'une expérience. Ce document à tirage limité est également disponible dans notre site Internet en format PDF.

Vous pouvez adresser vos demandes à :

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein, Québec (Québec)
Canada, G1P 3W8
Courriel : recherche.forestiere@mffp.gouv.qc.ca
Internet : mffp.gouv.qc.ca/les-forets/connaissances/recherche-developpement/

© Gouvernement du Québec

On peut citer ce texte en indiquant la référence. Citation recommandée :

Danneyrolles, V., S. Dupuis, Y. Boucher, J. Laflamme, G. Fortin, M. Leroyer, R. Terrail, Y. Bergeron et D. Arseneault, 2020.
Utilisation couplée des archives d'arpentage et de la classification écologique pour affiner les cibles de composition dans l'aménagement écosystémique des forêts tempérées du Québec. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 183. 36 p.

Toutes les publications produites par la Direction de la recherche forestière du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, sont protégées par les dispositions de la Loi sur le droit d'auteur, les lois, les politiques et les règlements du Canada, ainsi que par des accords internationaux. Il est interdit de reproduire, même partiellement, ces publications sans l'obtention préalable d'une permission écrite.

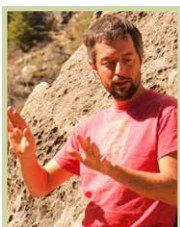
ISSN : 1183-3912
ISBN (PDF) : 978-2-550-86710-4
G.F.D.C. : 182.25 (714)
L.C. : SD 387.T5

Notes biographiques



Victor Danneyrolles est titulaire d'un doctorat en sciences de l'environnement de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (2016). Il a développé une expertise en écologie forestière et plus particulièrement sur la dynamique des forêts en lien avec les changements globaux. Il a collaboré et continue à collaborer à des

publications sur les forêts préindustrielles et les changements de végétation des derniers siècles au Québec.



Sébastien Dupuis est professionnel de recherche au laboratoire d'écologie historique et de dendrochronologie de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR). Il possède une expertise en écologie forestière et historique ainsi qu'en dendrochronologie, et plus particulièrement sur les archives d'arpentages.



Yan Boucher est ingénieur forestier et biologiste, chercheur scientifique à la Direction de la recherche forestière du Gouvernement du Québec depuis 2007. Il y dirige plusieurs travaux de recherche dont les objectifs convergent vers l'évaluation des effets à long terme des perturbations naturelles (feux, épidémies d'insectes) et

de l'aménagement forestier sur la structure, la composition et la croissance des écosystèmes forestiers. Les découvertes de son équipe guident les décisions d'aménagement forestier durable du Gouvernement du Québec.



Jason Laflamme est ingénieur forestier, diplômé de l'Université Laval depuis 2010. En 2012, le même établissement lui décerne le diplôme de maître ès sciences. Son projet portait sur la reconstitution des forêts préindustrielles de l'Outaouais sur la base de la classification écologique du MFFP. Depuis 2012, il travaille

comme professionnel à la Direction des inventaires forestiers, où il contribue aux travaux de cartographie écologique des écosystèmes forestiers et non forestiers et à différents projets portant sur la dynamique des forêts naturelles.



Gabriel Fortin est biologiste, titulaire d'un baccalauréat en sciences biologiques de l'Université de Montréal, d'une maîtrise en gestion de la faune et de ses habitats de l'UQAR et d'un doctorat en biologie de l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Au cours de ses études graduées et expériences de travail, il a développé

une spécialité en écologie forestière des forêts tempérées et boréales ainsi qu'en gestion de bases de données, en géomatique et en analyses statistiques. Il est chercheur au Centre d'expérimentation et de développement en forêt boréale (CEDFOB), où il travaille sur divers projets de recherche appliquée et de transfert technologique. Il participe notamment aux projets en lien avec l'étude de la qualité de la fibre dans le contexte de l'épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette, à la valorisation des produits forestiers non ligneux ainsi qu'à des projets d'implantation de nouvelles technologies en foresterie (drones, Lidar, intelligence artificielle).



Marie Leroyer est biologiste, titulaire d'une maîtrise en biodiversité, écologie et environnement de l'Université Joseph Fourier (Grenoble). Elle partage son temps en tant qu'enseignante en écologie/foresterie et apicultrice pour son exploitation dans le massif du Trièves en France. Elle a participé au dépouillement

des données d'arpentage au laboratoire d'écologie historique et de dendrochronologie de l'Université du Québec à Rimouski.



Raphaële Terrail est biologiste, titulaire d'un doctorat en biologie de l'Université du Québec à Rimouski. Après un parcours varié passant par l'écotoxicologie au courant de sa maîtrise, elle s'est spécialisée en écologie forestière et en écologie historique, notamment avec les archives d'arpentage et les analyses

spatiales. Elle est actuellement chargée de projet pour l'Organisme des bassins versants du Nord-Est du Bas-Saint-Laurent au sein duquel elle travaille à la protection de la ressource en eau et des milieux associés. L'impact de l'homme sur les écosystèmes est au centre de ses préoccupations et intérêts.



Yves Bergeron est titulaire d'un doctorat en sciences biologiques de l'Université de Montréal (1983). Il s'est joint en 1985 au corps professoral de l'Université du Québec à Montréal au Département des sciences biologiques. Depuis 1996, il est également professeur à l'Université du Québec en Abitibi-

Témiscamingue et codirecteur de l'institut de recherche sur les forêts depuis 2012. Ses travaux en recherche portent principalement sur la dynamique des écosystèmes forestiers appliquée à la sylviculture et à l'aménagement forestier durable de la forêt boréale. Il fait partie des chercheurs du Centre d'étude de la forêt (CEF). Il est aussi titulaire de la Chaire industrielle CRSNG-UQAT-UQAM en aménagement forestier durable depuis 1998 ainsi que d'une chaire de recherche du Canada en écologie et aménagement forestier. Il encadre actuellement plus d'une quarantaine d'étudiants aux cycles supérieurs et collabore à de nombreuses publications scientifiques et vulgarisées chaque année.



Dominique Arseneault est titulaire d'un baccalauréat en foresterie et d'un doctorat en biologie (Université Laval). Il est professeur à l'Université du Québec à Rimouski depuis 1996, où il s'intéresse aux effets des changements climatiques et des perturbations naturelles et anthropiques sur la dynamique à long terme des

écosystèmes et des paysages dans les zones tempérées et boréales. Ses principales approches sont la dendrochronologie et l'analyse d'archives historiques, comme les archives de l'arpentage primitif du Québec.

Résumé

La structure des paysages engendrée par les perturbations naturelles, le climat et le milieu physique permet de déterminer des états de référence pour l'aménagement écosystémique. La composition à l'échelle des paysages forestiers est l'un des enjeux clés de l'aménagement écosystémique. Dans cette étude, nous utilisons une base de données construite à partir d'archives d'arpentage contenant plus de 160 000 observations de la végétation couvrant la période 1790-1950 afin de reconstruire la composition des forêts préindustrielles et les changements survenus depuis dans le Québec méridional (principalement au sud du 49^e parallèle). Les changements ont été mesurés selon différents niveaux du système hiérarchique de classification écologique des forêts du Québec.

Nos résultats indiquent des changements de composition importants. Les forêts préindustrielles étaient à dominance résineuse et mixte (épinettes [*Picea* spp.], sapin baumier [*Abies balsamea* (L.) Mill.], bouleau jaune [*Betula alleghaniensis* Britton],

thuya occidental [*Thuja occidentalis* L.], pins [*Pinus* spp.], pruche [*Tsuga canadensis* (L.) Carrière]) et ont évolué vers des forêts actuelles dominées beaucoup plus par les feuillus (forte augmentation des érables [*Acer* spp.], des peupliers [*Populus* spp.] et du bouleau à papier [*Betula papyrifera* Marshall]). Cependant, la composition préindustrielle ainsi que les changements de composition variaient de manière importante à l'échelle régionale et se structuraient aussi à une échelle plus fine le long des toposéquences.

Cette étude procure aux aménagistes un outil permettant de déterminer, pour un territoire donné, à la fois les espèces cibles pour l'aménagement écosystémique ainsi que les sites les plus propices où concentrer les efforts d'aménagement. Ces états de références historiques doivent cependant être utilisés avec précaution dans le contexte des changements climatiques, qui pourraient affecter les conditions favorables à la présence de certaines espèces.

Mots-clés : aménagement forestier durable, forêts précoloniales, forêts décidues nordiques, forêts mélangées, restauration écologique

Abstract

The landscape structure generated by natural disturbances, climate and the physical environment helps determine the reference states that guide ecosystem-based management. The composition of forest landscapes is a key issue in ecosystem-based management. In this study, we use a large database constructed from early land survey archives containing more than 160 000 observations of vegetation covering the 1790–1950 period, in order to reconstruct the composition of pre-industrial forests and the compositional changes that have occurred since this period in southern Quebec (mainly south of the 49th parallel). The changes in forest composition were measured according to different levels of the Quebec’s hierarchical forest ecological classification system.

*Our results highlight some significant compositional changes. Preindustrial forests were predominantly coniferous and mixed (spruces [*Picea**

*spp.], balsam fir [*Abies balsamea* (L.) Mill.], yellow birch [*Betula alleghaniensis* Britton], eastern white cedar [*Thuja occidentalis* L.], pines [*Pinus* spp.], eastern hemlock [*Tsuga canadensis* (L.) Carrière]) and evolved into current forests that are much more hardwood-dominated (strong increase in maples [*Acer* spp.], poplars [*Populus* spp.] and paper birch [*Betula papyrifera* Marshall]). However, pre-industrial composition and compositional changes varied significantly at the regional scale and were also structured at a finer scale along the toposequence.*

This study provides forest managers with a tool to determine, for a given territory, both the target species for ecosystem-based management and the most suitable sites to focus management efforts. These historical reference states must, however, be used with caution in the context of climate change, which could affect favorable conditions for the presence of certain species.

Keywords: *ecological restoration, mixedwood forests, northern hardwoods, pre-settlement forests, sustainable forest management.*

Remerciements

Nous tenons à remercier Jean Noël pour son aide précieuse dans les traitements des données écoforestières du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP). Ces travaux ont été financés par le MFFP (projet n° 142332085 de la Direction de la recherche forestière [titulaire : Yan Boucher] en association avec la Direction des inventaires forestiers [Jocelyn Gosselin]), le Fonds de Recherche du Québec – Nature et Technologies (FRQNT), le Conseil de Recherches en Sciences

naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), la Chaire de recherche sur la forêt habitée (UQAR), la Chaire de recherche industrielle en aménagement forestier durable (CRSNG-UQAT-UQAM) ainsi que par un programme MITACS accélération en partenariat avec Geneviève Labrecque de Rayonier Advanced Materials Inc. (La Sarre, Québec). Nous remercions aussi Alexandre Dallaire-Théroux, Maripierre Jalbert, Nathalie Langlois et Denise Tousignant pour l'édition et la mise en page de ce document.

Table des matières

Résumé	v
Abstract	vi
Remerciements	vii
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xi
Liste des annexes	xi
Introduction	1
Chapitre 1 – Matériel et méthodes	3
1.1. Zones d'étude et classification écologique	3
1.2. Données historiques et modernes	4
1.3. Analyses	6
Chapitre 2 – Résultats	7
2.1. Composition des forêts préindustrielles	7
2.2. Changements de composition	16
Chapitre 3 – Discussion	19
3.1. Variations dans la composition préindustrielle	19
3.2. Changements de composition : causes et tendances	20
Conclusion et implications pour l'aménagement	23
Références bibliographiques	25
Annexes	31

Liste des tableaux

Tableau 1. Liste des végétations potentielles mentionnées dans cette étude.....	4
--	---

Liste des figures

Figure 1. Emplacement de la zone d'étude et des régions écologiques des forêts tempérées du Québec	3
Figure 2. Illustration schématique d'une toposéquence (ici pour la région écologique 2c; version simplifiée de Gosselin <i>et al.</i> 2007)	5
Figure 3. Fréquence relative des 13 principaux taxons (en %) par région écologique à l'époque préindustrielle et moderne	8
Figure 4. Cartographie de la fréquence relative des 10 principaux taxons pour les 542 districts écologiques comportant au moins 20 observations à l'époque préindustrielle et moderne	9
Figure 5. Cartographie de la fréquence relative des 13 taxons considérés dans cette étude pour les 542 districts écologiques comportant au moins 20 observations à l'époque préindustrielle et moderne et différence entre les deux époques	10
Figure 6. Fréquence relative (en %) des taxons par végétation potentielle et par région écologique, présentée pour les époques préindustrielle et moderne	12
Figure 7. Ordination NMDS (<i>non-metric multidimensional scaling</i>) de la composition des régions écologiques à l'époque préindustrielle et moderne	17

Liste des annexes

Annexe 1. Description synthétique des végétations potentielles considérées dans cette étude.....	31
Annexe 2. (a) Répartition des observations historiques dans la région d'étude, (b) décennie moyenne d'arpentage des observations par district écologique, et (c) distribution du nombre d'observations par décennie de publication des rapports d'arpentage par région écologique	34
Annexe 3. Nombre de taxons par observation pour les données préindustrielles et pour les données modernes après exclusion des taxons représentant moins de 5 % de la surface terrière totale par placette	35
Annexe 4. Fréquence relative moderne des principales espèces composant les regroupements de taxons (épinettes, érables, peupliers, pins) par district écologique	36

Introduction

Depuis quelques décennies, à l'échelle globale, on observe une transformation des modèles de gestion forestière traditionnels centrés sur la production de matière ligneuse vers des modèles plus durables qui visent à intégrer les enjeux écologiques et sociaux (Davis *et al.* 2005, Kohm et Franklin 1997). Dans ce contexte, le nouveau régime forestier du Québec donne une place centrale au concept d'aménagement écosystémique (AE), dont le principal objectif est de réduire les écarts entre les forêts aménagées et les forêts naturelles (Gauthier *et al.* 2009, Grenon *et al.* 2010). Ce concept se base sur l'idée que le maintien des écosystèmes à l'intérieur des limites de variabilité naturelle permet d'assurer le maintien de la biodiversité et de l'intégrité écologique des forêts (Gauthier *et al.* 2009, Larocque 2016, Lindenmayer et Franklin 2002). La structure des paysages engendrée par les perturbations naturelles, le climat et le milieu physique doivent alors servir d'état de référence, permettant par la suite de déterminer des enjeux (c.-à-d. les écarts entre les forêts aménagées et naturelles) et finalement dresser des cibles pour l'AE (Bouchard *et al.* 2015, Boucher *et al.* 2011, Gauthier *et al.* 2009, Grondin *et al.* 2018, Kneeshaw et Bergeron 2016).

Au Québec, un système hiérarchique de classification écologique du territoire a été développé en parallèle du concept d'AE, et conçu de manière à être pleinement intégré à ce nouveau mode d'aménagement (Bergeron *et al.* 1992, Saucier *et al.* 2009, 2010). Il consiste en différents niveaux hiérarchiques imbriqués, allant du niveau supérieur des zones de végétation (échelle continentale, p. ex. les forêts tempérées et boréales; 10^5 à 10^6 km²), au niveau inférieur représenté par les types écologiques (échelle locale; 10^2 à 10^4 m²), formés par la combinaison de la végétation potentielle et des caractéristiques du milieu physique. Les différents niveaux qui forment le système hiérarchique contiennent une information écologique cohérente qui prend en compte l'ensemble des facteurs contrôlant la dynamique des écosystèmes forestiers (Saucier *et al.* 2009, 2010). Cependant, les informations sur la dynamique des forêts et la détermination de la végétation potentielle ont été déduites à partir de la végétation actuelle. Or, dans certaines régions

comme le sud du Québec, la dynamique actuelle des forêts naturelles a été profondément modifiée par les activités humaines des derniers siècles. Dans ce cas de figure, il est possible d'améliorer la caractérisation des végétations potentielles par des connaissances issues d'états de référence historiques (Boucher *et al.* 2006, Egan et Howell 2001, Grondin *et al.* 2018, Hennebelle *et al.* 2018, Higgs *et al.* 2014, Jackson et Hobbs 2009, Whitney 1994), comme les forêts préindustrielles en place avant la colonisation et l'exploitation industrielle du territoire. Les états de référence historiques doivent cependant être utilisés avec précaution dans le contexte de changements climatiques. Leur utilisation « stricte » pourrait mener à ce que des écosystèmes non adaptés aux conditions climatiques futures soient favorisés (Choi *et al.* 2008, Périé *et al.* 2014, Périé et de Blois 2016). Les états de référence ne doivent donc pas être pris comme des cibles ultimes, mais doivent plutôt constituer une base de réflexion et d'inspiration pour développer des cibles adaptatives aux changements de conditions environnementales (Boulanger *et al.* 2019, Choi *et al.* 2008, Gagné *et al.* 2015, Millar *et al.* 2007).

Dans cette étude, nous utilisons une base de données construite à partir d'archives d'arpentage contenant plus de 160 000 observations de la végétation couvrant la période 1790-1950 afin de reconstituer la composition des forêts préindustrielles et les changements survenus depuis dans le Québec méridional (principalement au sud du 49^e parallèle). Le principal objectif de cette étude était de documenter la structuration de la composition des forêts préindustrielles et de repérer les écarts avec la composition moderne. Ainsi, les aménagistes seront en mesure d'affiner les cibles de composition de l'AE, tout en tenant compte des impacts anticipés des changements climatiques (Comité d'experts sur l'aménagement écosystémique des forêts et les changements climatiques 2017). De ce fait, les écarts ont été mesurés selon différents niveaux hiérarchiques de la classification écologique des forêts du Québec. Finalement, nous discutons des causes des changements de composition observés et des implications de nos résultats pour l'AE.

Chapitre 1

Matériel et méthodes

1.1. Zones d'étude et classification écologique

La zone d'étude couvre plus de 200 000 km² appartenant aux forêts tempérées décidues et mélangées au sud et aux forêts boréales mixtes ou à dominance résineuse au nord (figure 1). La température annuelle moyenne varie approximativement de 7 °C à 0 °C du sud vers le nord, et les précipitations annuelles totales moyennes varient approximativement de 1350 mm à 850 mm d'est en ouest (normales 1970-2000; Fick et Hijmans 2017). La zone se divise aussi sur le plan géologique et topographique (Robitaille et Saucier 1998). Au nord-ouest du Saint-Laurent, les collines arrondies du Bouclier canadien sont caractérisées par un socle de roches cristallines recouvert principalement par des dépôts glaciaires épais. À l'est, les reliefs anciens de la chaîne des Appalaches sont composés d'un socle rocheux sédimentaire recouvert de tills ou de dépôts d'altération. Enfin, ces deux zones sont séparées par les basses-terres du Saint-Laurent caractérisées par des dépôts marins profonds.

De tels dépôts marins se trouvent aussi dans les basses-terres de la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean et de la vallée de la rivière des Outaouais.

Selon les niveaux supérieurs du système hiérarchique de classification écologique du territoire du Québec, la zone d'étude recoupe 5 domaines bioclimatiques et 17 régions écologiques (figure 1; Saucier *et al.* 2009). Huit régions écologiques appartiennent aux domaines bioclimatiques des érablières, c'est-à-dire l'érablière à caryer (région écologique 1a), l'érablière à tilleul (2a, 2b et 2c) et l'érablière à bouleau jaune (3a, 3b, 3c et 3d). Elles sont caractérisées par une importante abondance de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) en association avec d'autres espèces feuillues et résineuses tempérées. Les 9 autres régions écologiques appartiennent aux domaines des sapinières, c'est-à-dire la sapinière à bouleau jaune (régions 4a, 4d, 4e, 4f, 4g et 4h) et la sapinière à bouleau blanc (5d, 5h et 5i). Elles sont caractérisées par une forte abondance du sapin

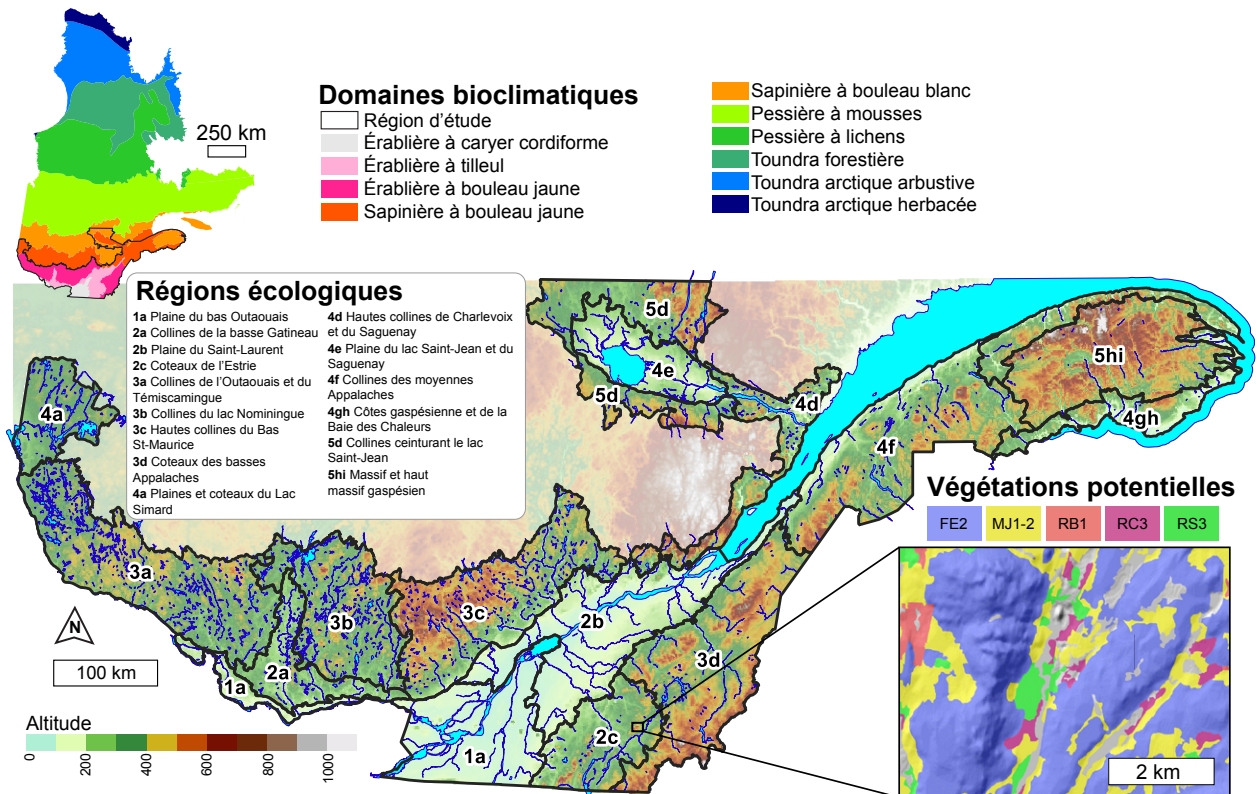


Figure 1. Emplacement de la zone d'étude et des régions écologiques des forêts tempérées du Québec. La carte en bas à droite illustre la répartition des végétations potentielles à l'échelle du paysage.

baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) et des épinettes (*Picea* spp.) en association avec d'autres espèces boréales. Certaines régions écologiques (4gh et 5hi) ont été regroupées afin de simplifier la présentation des résultats (figure 1).

Les végétations potentielles correspondent à un niveau inférieur du système hiérarchique de classification écologique du territoire du Québec qui caractérise la végétation à l'échelle locale (figure 1, tableau 1). La végétation potentielle représente une unité de classification écologique qui regroupe les différents types de végétation d'un site donné. Ces types peuvent se reconstituer à la suite d'une perturbation ou se succéder jusqu'à atteindre un stade de fin de succession. Chaque végétation potentielle est donc définie par son propre assemblage d'espèces végétales, son régime de perturbation et sa dynamique (MRN 2013, Saucier *et al.* 2010). L'annexe 1 offre une description détaillée des végétations potentielles considérées dans cette étude. Dans chaque région écologique, la répartition des végétations potentielles peut aussi être schématiquement associée à une toposéquence (figure 2; Gosselin *et al.* 2007). Dans nos analyses, plusieurs végétations potentielles ont également été regroupées afin de simplifier la présentation des résultats (les regroupements peuvent différer selon les régions écologiques). De plus, certains regroupements ont été faits au niveau inférieur de la classification du type écologique, qui correspond à la végétation potentielle à laquelle est ajouté un code correspondant au milieu physique spécifique des sites (MFFP 2018). Il est important de préciser que ces schématisations par toposéquence représentent une vision très simplifiée de l'organisation spatiale des végétations potentielles dans chaque région écologique, alors qu'en réalité, certaines végétations potentielles peuvent être présentes à différentes positions sur la pente, en fonction par exemple de changement dans les conditions de dépôt-drainage (voir Gosselin *et al.* 2007 pour une description plus détaillée des toposéquences de chacune des régions écologiques). Cependant, dans le contexte de ce mémoire, même un schéma avec un faible degré de précision reste très pertinent pour décrire les grandes tendances dans la composition des forêts à l'échelle locale.

1.2. Données historiques et modernes

La composition préindustrielle des forêts a été reconstituée à partir de données extraites des carnets rapportant les campagnes d'arpentage primitif de plus de 500 cantons et d'une vingtaine de concessions forestières entre 1795 et 1950 (annexe 1). Les cantons (dimensions : généralement

Tableau 1. Liste des végétations potentielles mentionnées dans cette étude.

Végétations potentielles	
FC1	Chênaie rouge
FE1	Érablière à caryer cordiforme
FE2	Érablière à tilleul
FE3	Érablière à bouleau jaune
FE4	Érablière à bouleau jaune et hêtre
FE6	Érablière à chêne rouge
FO1	Ormaie à frêne noir
MF1	Frênaie noire à sapin
MJ1	Bétulaie jaune à sapin et érable à sucre
MJ2	Bétulaie jaune à sapin
MS1	Sapinière à bouleau jaune
MS2	Sapinière à bouleau blanc
MS6	Sapinière à érable rouge
RB1	Pessière blanche ou cédrière issue d'agriculture
RC3	Cédrière tourbeuse à sapin*
RE3	Pessière noire à sphaignes
RP1	Pinède blanche ou pinède rouge
RS1	Sapinière à thuya
RS2	Sapinière à épinette noire
RS3	Sapinière à épinette noire et sphaignes
RS5	Sapinière à épinette rouge
RT1	Prucheraie

* Il est important de noter ici que dans nos analyses, les sapinières à thuya sur site humide (type écologique RS18) ont été regroupées avec les cédrières tourbeuses (RC3).

de 16 km × 16 km) ont été arpentés le long de leurs limites extérieures et le long de leurs rangs (subdivisions espacées de 1,6 km; annexe 2), et les arpenteurs décrivaient la composition des forêts. Les concessions forestières ont été arpentées seulement le long de leurs limites extérieures et étaient de tailles variables (ces observations issues de concessions forestières utilisées dans cette étude représentent moins de 2 % de la base de données et sont uniquement situées dans la région écologique 3a). Dans cette étude, nous avons retenu seulement les observations qui mentionnaient des listes de taxons (p. ex. : « Pins, bouleau jaune, cèdre et quelques érables ») et qui étaient précisément géoréférencées à partir des cartes cadastrales actuelles et historiques. Les observations se divisaient aussi selon deux types géométriques : les descriptions linéaires et les observations ponctuelles. Dans le but d'analyser ces deux catégories dans la même base de données, nous avons attribué un poids à chaque observation, correspondant à la longueur

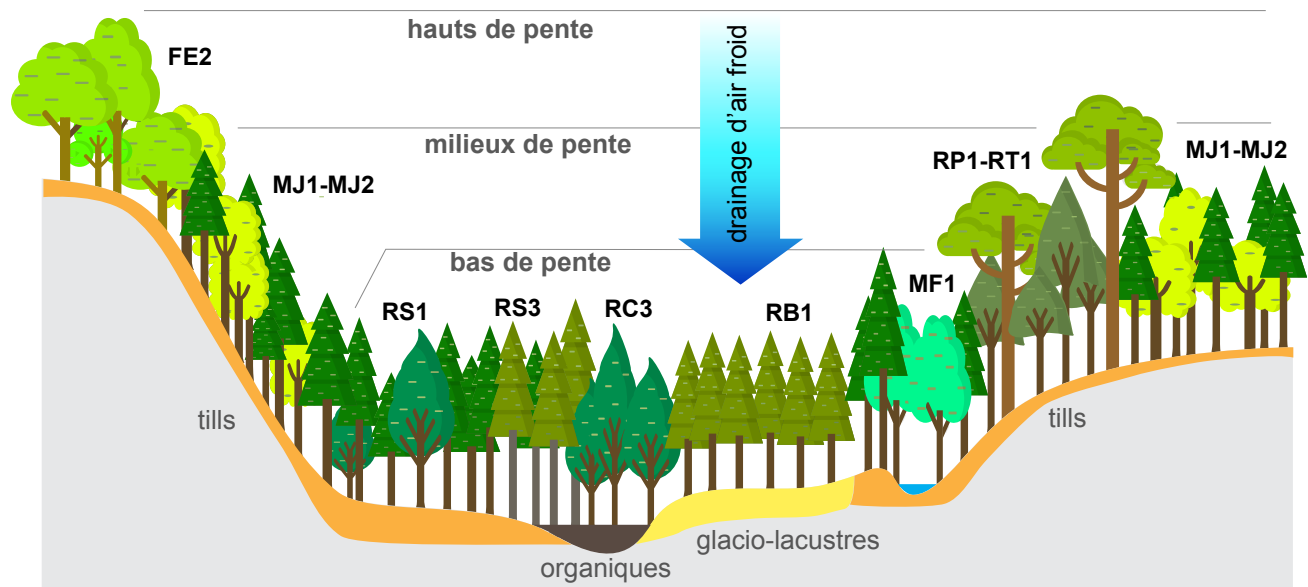


Figure 2. Illustration schématique d'une toposéquence (ici pour la région écologique 2c; version simplifiée de Gosselin *et al.* 2007). Le gradient topographique est associé à des variations dans les caractéristiques de dépôt-drainage et possiblement microclimatiques qui contrôlent une part importante de la composition à l'échelle du paysage. Plus particulièrement, on trouve généralement des dépôts plus profonds et moins bien drainés dans les bas de pente que dans les hauts de pente. De plus, il est possible que le phénomène de drainage d'air froid dans le fond de certaines vallées soit à l'origine de conditions microclimatiques plus chaudes sur les hauts de pente que dans les bas de pente. Il est important de préciser que la schématisation par toposéquence représente une vision simplifiée de l'organisation spatiale des végétations potentielles dans chaque région écologique. En réalité, certaines végétations potentielles peuvent être présentes à différentes positions sur la pente, en fonction par exemple de changement dans les conditions de dépôt-drainage (voir Gosselin *et al.* 2007 pour une description plus détaillée des toposéquences pour chaque région). Cependant, ce degré de précision approximatif reste très pertinent pour décrire les grandes tendances dans la composition des forêts à l'échelle locale.

des lignes ou à l'espacement moyen des points à leurs observations adjacentes (c.-à-d. précédentes et suivantes; Dupuis *et al.* 2011). Nous avons défini des bornes à 100 m et à 1600 m pour les poids, afin de ne pas donner une importance disproportionnée aux observations très espacées entre elles. La grande majorité (> 85 %) des observations dataient d'avant 1900 (annexe 1), ce qui assure une description de forêts peu ou pas anthropisée. Cependant, pour la région écologique 5hi regroupant le Massif gaspésien et le Haut massif gaspésien (figure 1), peu d'archives d'avant 1900 étaient disponibles et le développement industriel a été plus tardif par rapport aux autres régions écologiques (Pinna *et al.* 2009); dans ce cas particulier, nous avons retenu une grande proportion d'observations datant de la période 1900-1950 (annexe 2). Au total, la base de données utilisée dans cette étude comprend 160 056 observations (listes de taxons) géoréférencées. De récentes recherches (Terrail *et al.* 2014) ont bien confirmé la pertinence, la fiabilité et la précision des données d'arpentage pour reconstituer la composition des forêts préindustrielles.

La composition moderne des forêts a été analysée avec les placettes-échantillons temporaires des trois derniers inventaires écoforestiers du MFFP (1980-2010). Ces inventaires sont basés sur des placettes circulaires de 400 m² distribuées selon un échantillonnage aléatoire stratifié en fonction des différents types de forêts productives (MFFP 2016). Dans les placettes, toutes les tiges de DHP (diamètre à hauteur de poitrine, mesuré à 1,3 m) de plus de 9 cm sont mesurées et inventoriées par espèce et par classe de DHP de 2 cm. Seules les placettes situées à une distance limite du réseau d'observations historiques ont été sélectionnées pour décrire la végétation moderne. Cette distance limite a été étendue à 3 km dans les zones à forte densité d'arpentage et à 1 km dans les zones à faible densité d'arpentage (annexe 2). Ces distances ont été retenues de manière à assurer un nombre d'observations d'arpentage et de placettes modernes équivalent, aussi bien dans les secteurs où la densité d'observation d'arpentage était plus faible (par ex. : régions 3a, 5hi; annexe 2) que dans les secteurs où la densité d'observation d'arpentage était très élevée (par ex. : régions 3d; annexe 2).

Au total, l'ensemble compte 86 306 placettes. Les données d'inventaire ont été transformées en surface terrière ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) par espèce pour chaque placette. Certaines espèces d'un même genre (épinettes, pins, érables, peupliers et frênes) ont été regroupées pour correspondre aux taxons mentionnés par les arpenteurs. Les taxons qui représentaient moins de 5 % de la surface terrière totale d'une placette ont été exclus de manière à ce que le nombre moyen et le nombre médian de taxons par observation soient équivalents dans les jeux de données préindustriel et moderne (annexe 3).

1.3. Analyses

Afin d'évaluer les changements de composition, nous avons calculé la fréquence relative des 13 principaux taxons des deux époques (préindustrielle et moderne). Pour l'époque préindustrielle, la fréquence absolue d'un taxon correspond à la somme des poids des observations dans lesquelles ce taxon est mentionné, divisée par le poids total des observations dans un territoire donné. Pour l'époque moderne, la fréquence absolue d'un taxon correspond au nombre d'observations où ce taxon est mentionné divisé par le nombre total d'observations. Nous avons ensuite transformé les fréquences absolues en fréquence relative 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 %. Afin de simplifier la présentation des résultats, nous n'avons retenu que la fréquence relative, dans la mesure où elle représente la description la plus exhaustive de la composition (Terrail *et al.* 2014), et ce, bien que d'autres indices existent. Le calcul des fréquences relatives préindustrielles et modernes pour différents niveaux du système hiérarchique de classification

écologique du Québec comporte deux étapes : d'abord, la compilation des observations historiques et les placettes d'inventaire moderne séparément par région écologique, par district écologique et par végétation potentielle, en superposant leurs géolocalisations avec les cartes écoforestières les plus récentes (MFFP 2018); ensuite, le calcul des fréquences relatives préindustrielles et modernes des principaux taxons pour ces différents niveaux de classification. Nous n'avons retenu que les districts écologiques comportant au moins 20 observations aux époques préindustrielle et moderne, et dans les calculs des changements de composition par végétation potentielle, que les observations historiques linéaires dont la taille était inférieure à 300 m, puisque des lignes plus longues pourraient traverser plusieurs végétations potentielles. Pour calculer des intervalles de confiance, nous avons utilisé une procédure *bootstrap*, en recalculant la fréquence relative des taxons pour 999 échantillons tirés aléatoirement (avec remise) dans chaque jeu de données (préindustriel et moderne).

Nous avons utilisé une méthode d'ordination (*non-metric multidimensional scaling*, ou NMDS) pour illustrer graphiquement la direction et l'intensité des changements de composition pour chaque région écologique. Une matrice de distance (distance de Bray-Curtis; Legendre et De Cáceres 2013) a été calculée à partir de la fréquence relative par région écologique des 13 taxons les plus fréquents pour les deux époques prises ensemble. Par la suite, nous avons construit l'ordination sur la base de cette matrice de distance avec la fonction *metaMDS* du progiciel *vegan* (Oksanen *et al.* 2017) dans R (R Core Team 2017). Ce type d'analyse permet de réduire la complexité d'un jeu de données multivariées en les réduisant à un ou quelques axes qui expliquent le mieux la variance des données.

Chapitre 2

Résultats

2.1. Composition des forêts préindustrielles

Sur l'ensemble de la zone d'étude, les taxons les plus fréquents à l'époque préindustrielle étaient les épinettes et le sapin, avec des fréquences relatives moyennes sur l'ensemble des régions écologiques de 21 % et de 18 %, respectivement (figure 3). Ces résineux dominants étaient suivis par deux espèces feuillues : le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton) et le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marshall) avec des fréquences relatives moyennes de 12 % et 11 %, respectivement (figure 3). Les fréquences relatives du thuya occidental (*Thuja occidentalis* L.), des pins (*Pinus* spp.) et des érables (*Acer* spp.) variaient autour de 8 % en moyenne, et enfin celle de la pruche (*Tsuga canadiensis* (L.) Carrière), du hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.) et des peupliers (*Populus* spp.) autour de 4 % en moyenne (figure 3). Au-delà de ces tendances sur l'ensemble de la région d'étude, la composition variait significativement d'une région écologique à l'autre (figures 3, 4 et 5).

Les régions écologiques du sud-ouest (1a, 2a et 3a) montraient la particularité de la dominance des pins (fréquences relatives de 18 à 24 %; figures 3 et 4) accompagnée d'une composition mixte diversifiée (érables, bouleau jaune, pruche, sapin, hêtre, etc.; figures 3 et 5). Dans ces régions, les pins tendaient à dominer l'ensemble de la toposéquence, mais étaient légèrement moins fréquents sur les sites mal drainés des bas de pente (MF1, RC3, RE3, RS3; figure 6). La fréquence de la pruche, des érables et du hêtre diminuait des hauts (FC1, FE1, FE2, FE3, FE6) vers les bas de pente, tandis qu'inversement, le thuya, les épinettes et le sapin étaient plus fréquents sur les bas de pente (figure 6).

Dans les régions écologiques de la Plaine du Saint-Laurent et des Coteaux de l'Estrie (2b et 2c), les épinettes formaient le taxon le plus fréquent (25 % et 20 %, respectivement; figure 3) en association avec une composition mixte (pruche, bouleau jaune, thuya, érables et hêtre; figures 3 et 4). Ce sont dans ces régions écologiques que l'on observait la plus grande abondance de la pruche et la plus faible fréquence du sapin. On observait aussi la plus forte abondance du hêtre dans les Coteaux de l'Estrie

(2c; figure 3). Les épinettes dominaient toute la toposéquence tandis que l'abondance de la pruche, du bouleau jaune, des érables et du hêtre diminuait des hauts (FE2, MJ1-MJ2) et milieux de pente (RP1-RT1, RS1-RS5) vers les bas de pente (RC3-RS18, RS3; figure 6). Dans les bas de pente, les épinettes étaient associées au thuya et au mélèze laricin (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch) (figure 6).

Dans les régions écologiques plus à l'est appartenant au domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune (3b, 3c, 3d), on observait des forêts mixtes composées d'épinettes (de 14 % à 26 %), de sapin (de 14 % à 21 %) et de bouleau jaune (de 15 % à 20 %; figures 3 et 4). Le thuya et les érables y étaient également fréquents (≈ 10 %) et, selon les régions écologiques, on observe une fréquence non négligeable de hêtre, de pruche et de pins (figures 4 et 5). Les feuillus (bouleau jaune, érables, hêtre) étaient plus fréquents dans les hauts de pente (FC1-FE6, FE2-FE3), tandis que les résineux (épinettes, sapin, thuya) étaient plus fréquents dans les milieux (MJ1-MJ2, RS1, RS5) et bas de pente (MF1, RC3-RS18, RE3-RS3) (figure 6). Toutefois, les sommets de la région écologique 3d (MS2), plus hauts en altitude, étaient dominés par des taxons résineux (figure 6).

Les régions écologiques appartenant aux domaines bioclimatiques des sapinières de la moitié est de la région d'étude (4d, 4f, 4gh et 5hi) montraient une composition majoritairement résineuse dominée par les épinettes (de 23 % à 35 %), le sapin (de 22 % à 33 %) et le bouleau à papier (≈ 20 %; figures 3 et 4). Le thuya et le bouleau jaune (et, dans une moindre mesure, les érables) étaient aussi présents dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune (4d, 4f, 4gh). On trouvait des peuplements mixtes (bouleau jaune, érables, épinettes, sapin) sur les hauts de pente dans les régions écologiques 4f et 4g (FE4, FE3), et plus de peuplements de résineux (sapin, épinettes, bouleau à papier) sur les sommets et hauts de pente des régions écologiques 4gh et 5hi (RS2, MS2) (figure 6). Les bas de pente moins bien drainés (RC3-RS18, RE3-RS3) étaient dominés par les épinettes, le sapin et le thuya (figure 6).

Finalement, les régions écologiques appartenant aux domaines des sapinières de la moitié ouest de la région (4a, 4e et 5d) avaient également une composition majoritairement résineuse dominée par les épinettes (25 % à 28 %), le sapin (de 18 % à 22 %) et le bouleau à papier (≈ 20 %; figure 3). Cependant, les pins y étaient particulièrement

abondants (≈ 10 %; figure 3), de même que les peupliers par rapport au thuya et au bouleau jaune. Dans ces régions écologiques avec peu de relief (particulièrement les régions 4a et 4e), la composition semblait varier peu le long des toposéquences (figure 6).

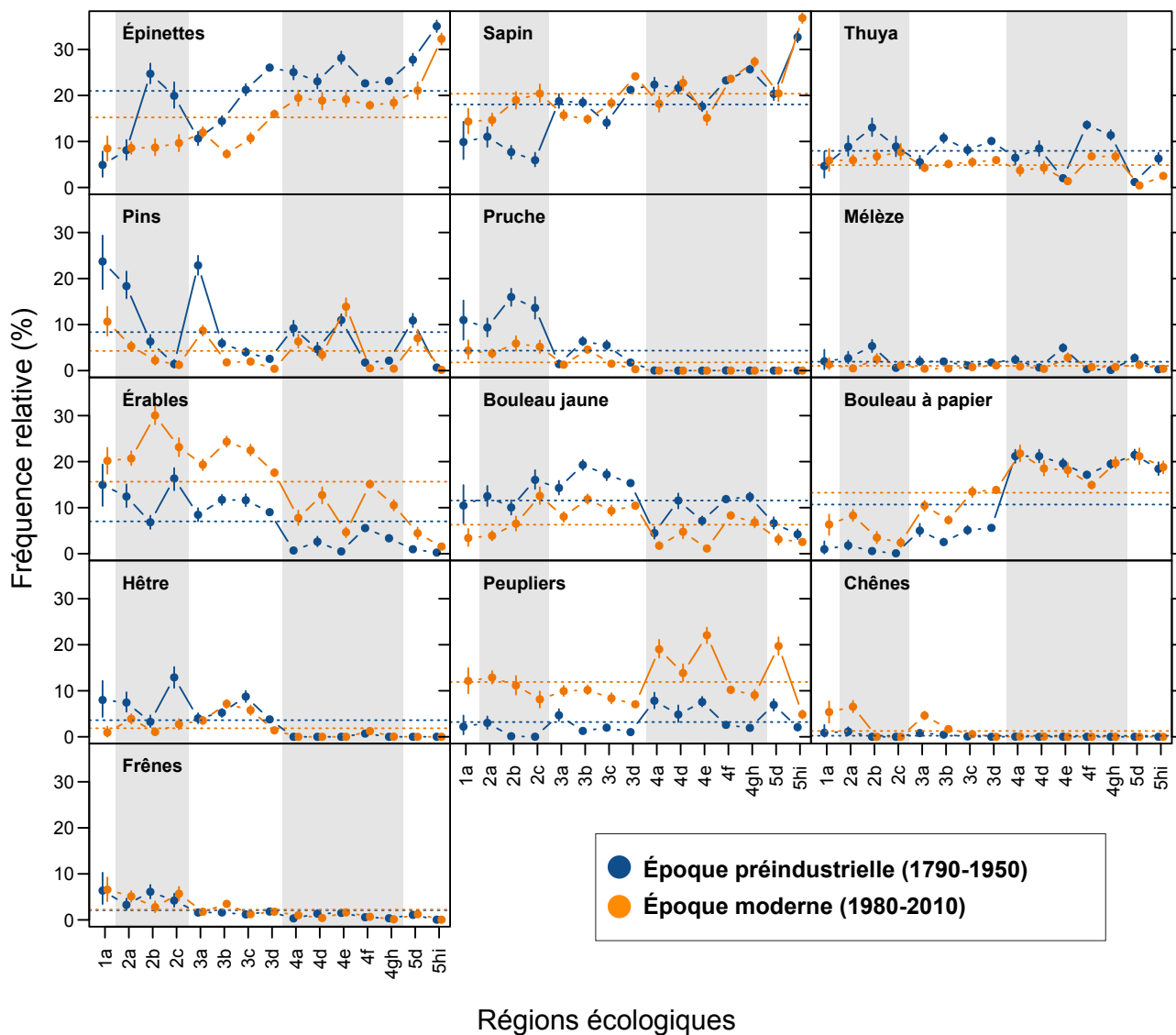
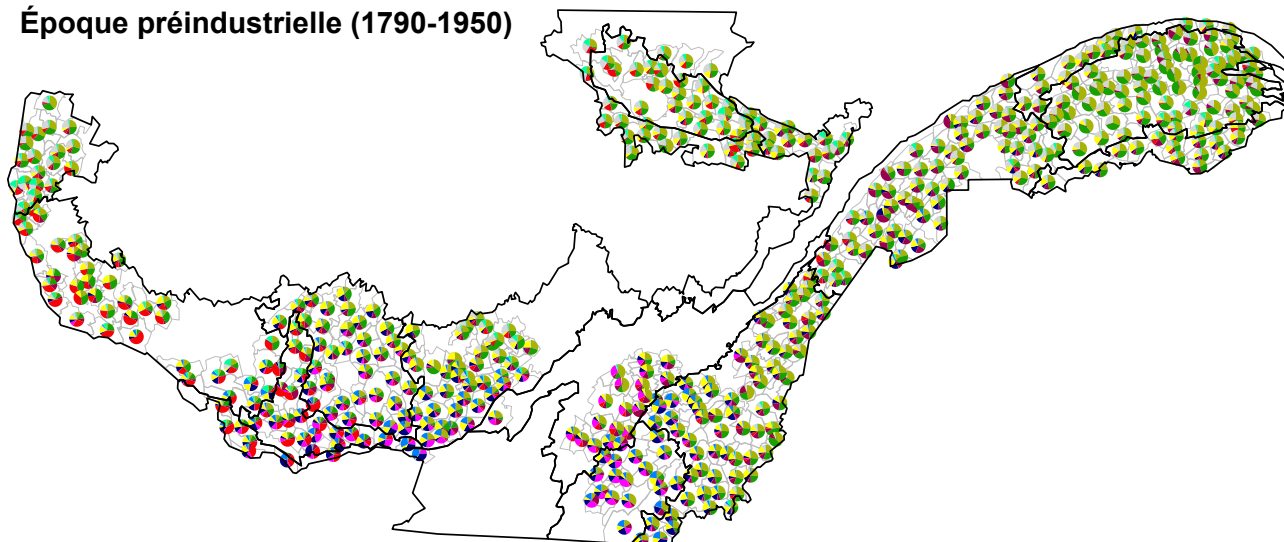
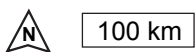
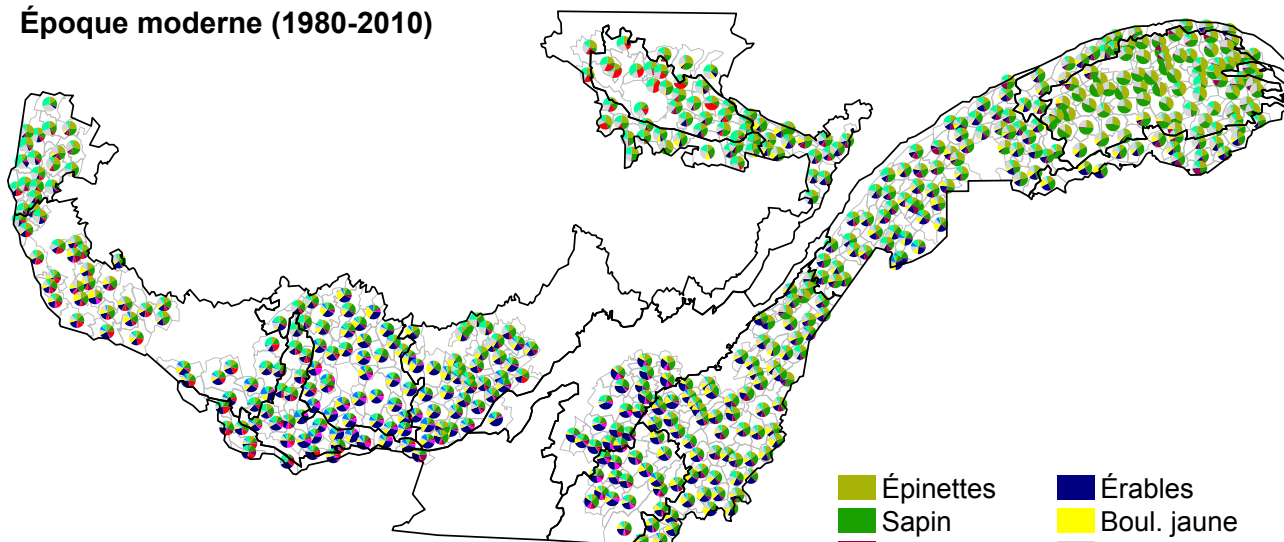


Figure 3. Fréquence relative des 13 principaux taxons (en %) par région écologique à l'époque préindustrielle et moderne. Les points représentent la fréquence relative de chaque taxon dans chaque région écologique. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95 % des distributions obtenues par la procédure de *bootstrap* (999 rééchantillonnages aléatoires, avec remise, d'un dixième des observations dans chaque région écologique). Les lignes horizontales représentent les moyennes pour l'ensemble des régions à l'époque préindustrielle (bleu) et moderne (orange). Les zones grisées séparent les domaines bioclimatiques.

Époque préindustrielle (1790-1950)



Époque moderne (1980-2010)



- | | |
|-----------|----------------|
| Épinettes | Érables |
| Sapin | Boul. jaune |
| Thuya | Boul. à papier |
| Pins | Hêtre |
| Pruche | Peupliers |

Figure 4. Cartographie de la fréquence relative des 10 principaux taxons pour les 542 districts écologiques comportant au moins 20 observations à l'époque préindustrielle et moderne.

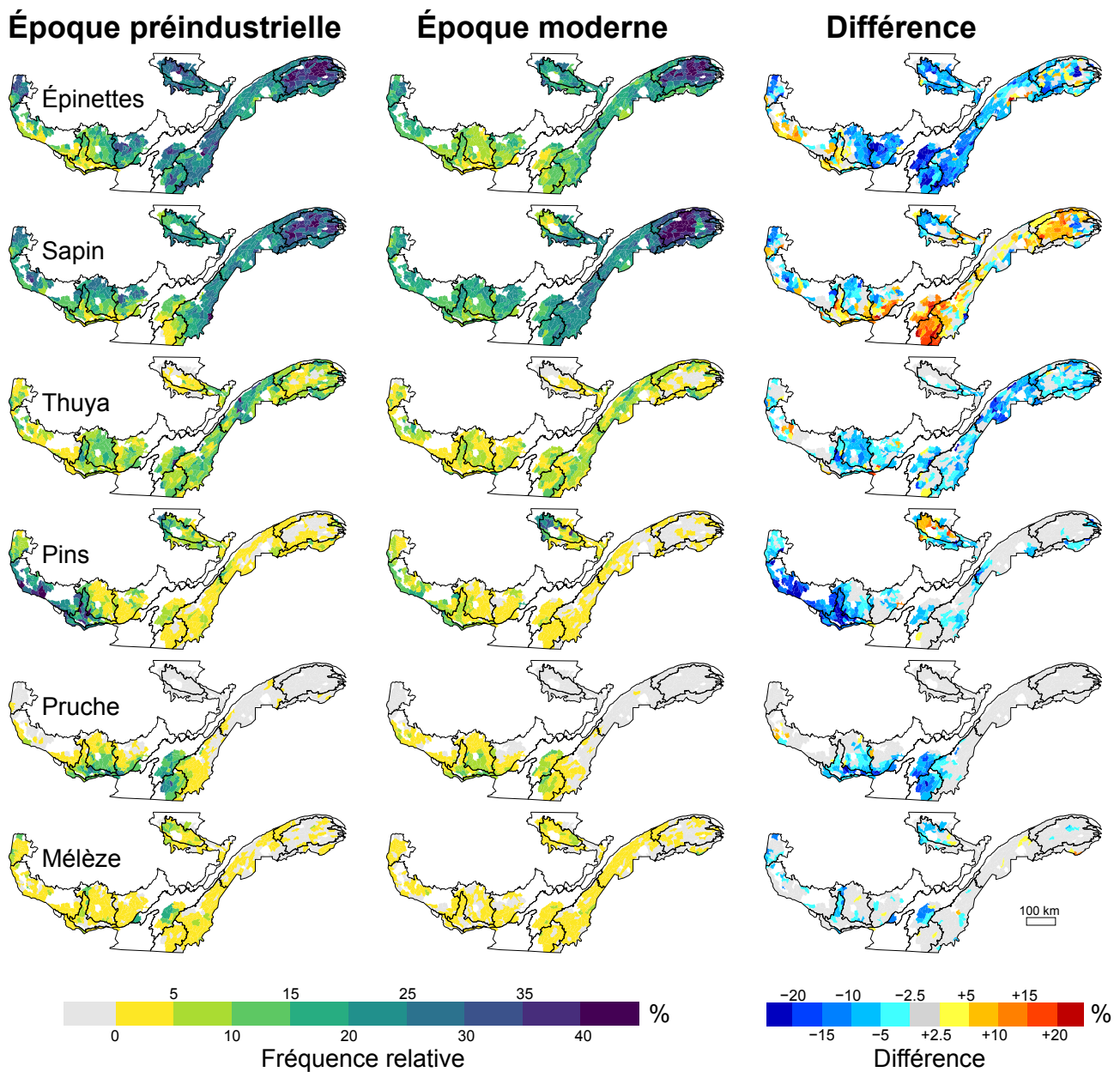


Figure 5. Cartographie de la fréquence relative des 13 taxons considérés dans cette étude pour les 542 districts écologiques comportant au moins 20 observations à l'époque préindustrielle et moderne et différence entre les deux époques. Les taxons résineux et feuillus sont présentés séparément, par ordre de fréquence décroissante.

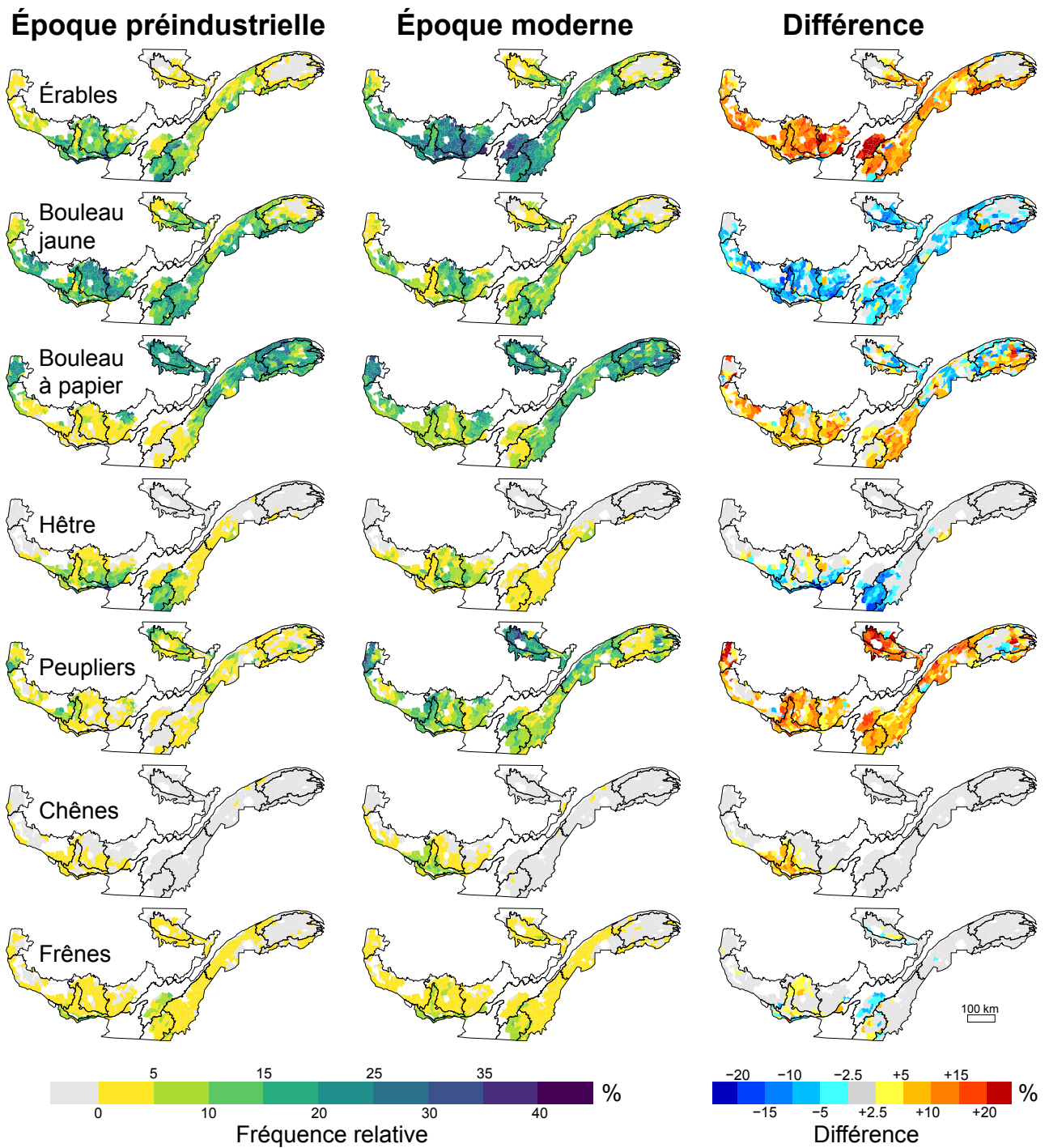


Figure 5. (suite et fin)

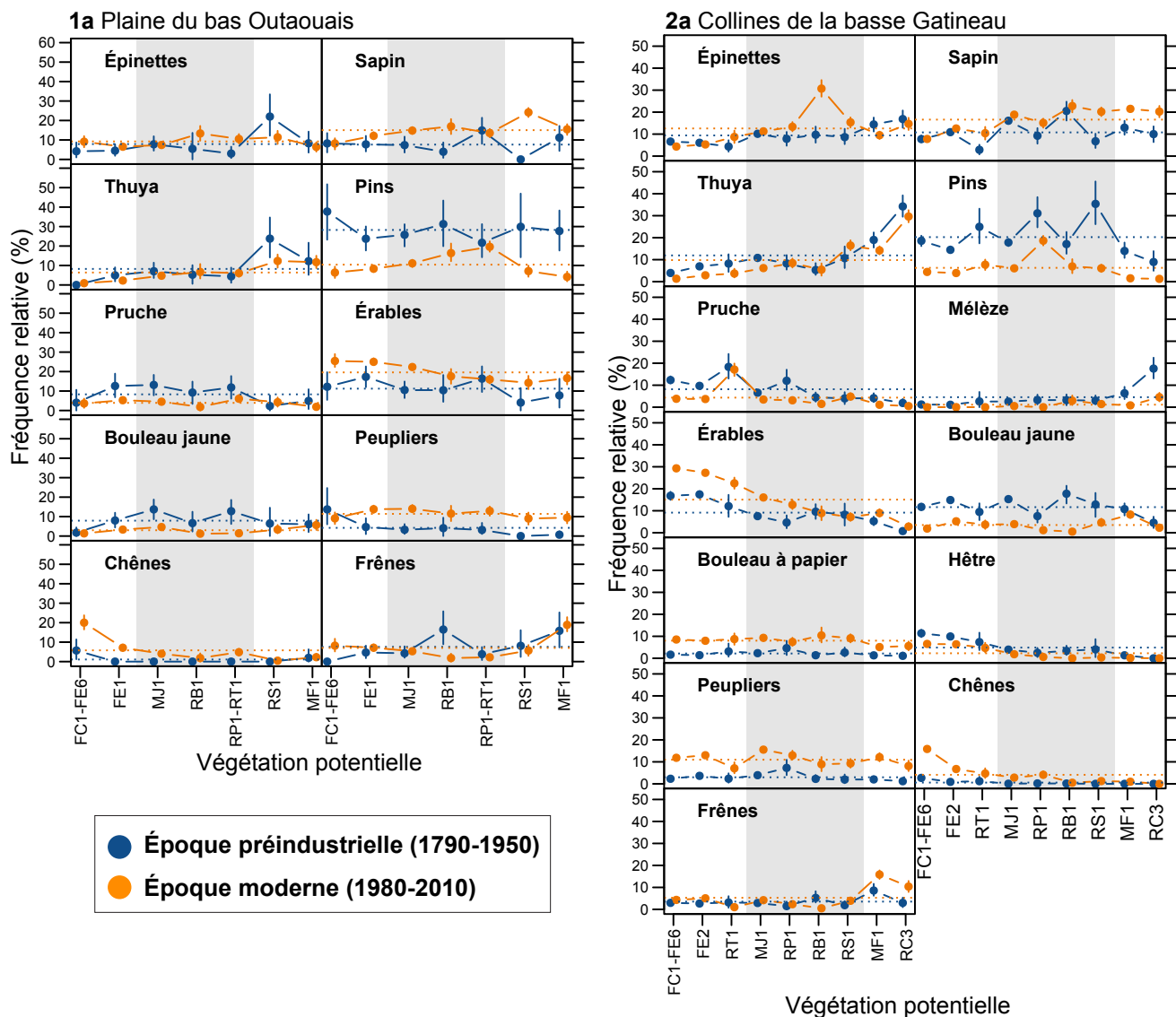


Figure 6. Fréquence relative (en %) des taxons par végétation potentielle et par région écologique, présentée pour les époques préindustrielle et moderne. Les points représentent la fréquence relative de chaque taxon dans chaque végétation potentielle et les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance 95 % des distributions obtenues par la procédure de bootstrap (999 rééchantillonnages aléatoires avec remise de l'ensemble des observations dans chaque végétation potentielle ou groupe de végétations potentielles). Les lignes horizontales représentent les moyennes pour l'ensemble des végétations potentielles à l'époque préindustrielle (bleu) et moderne (orange). Les zones grisées séparent les milieux de pente des bas (droite) et des hauts (gauche) de pente. Cette schématisation par toposéquence représente une vision simplifiée de l'organisation spatiale des végétations potentielles dans chaque région écologique (certaines végétations potentielles peuvent être présentes à différentes positions sur la pente).

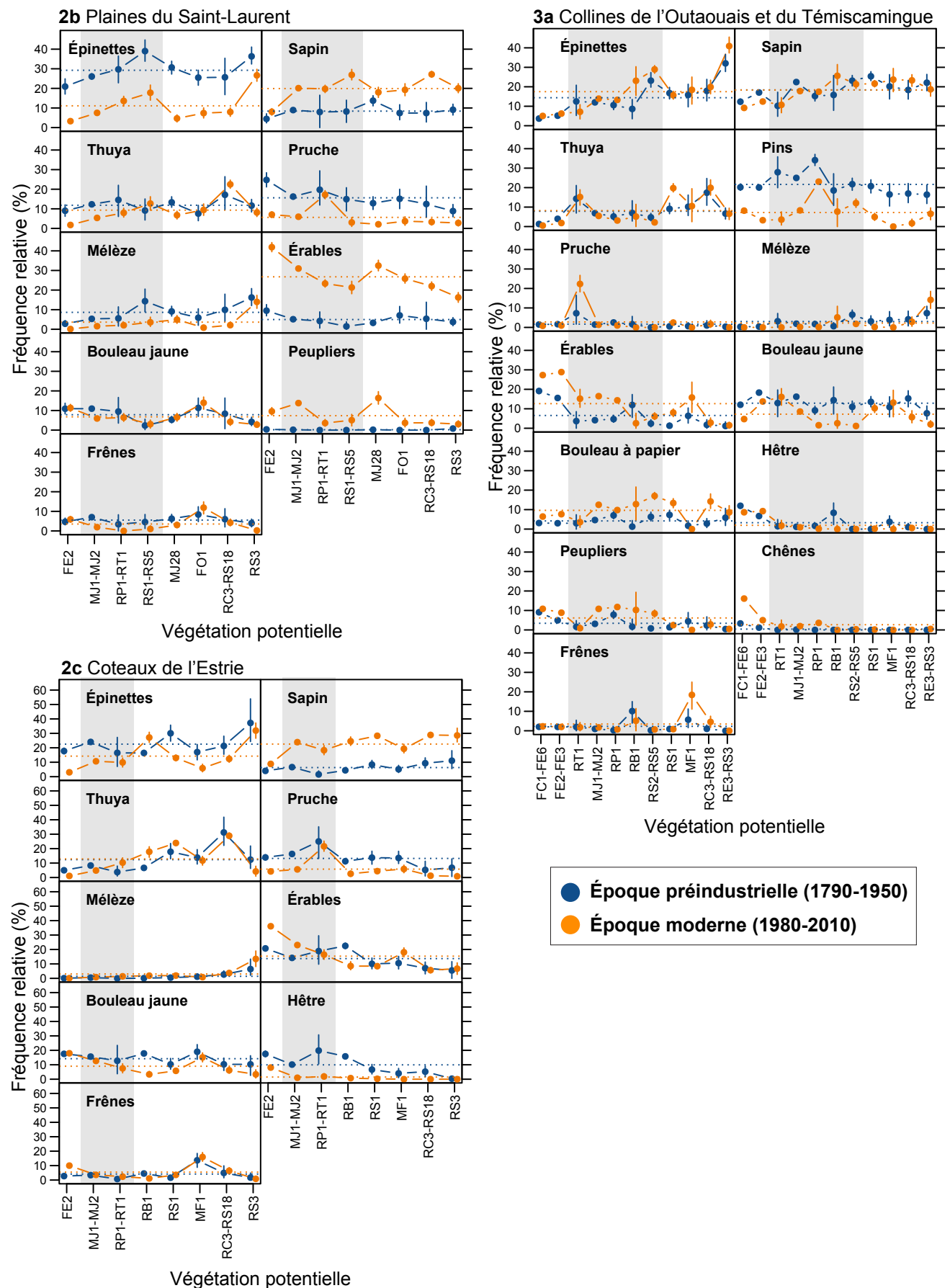


Figure 6. (suite)

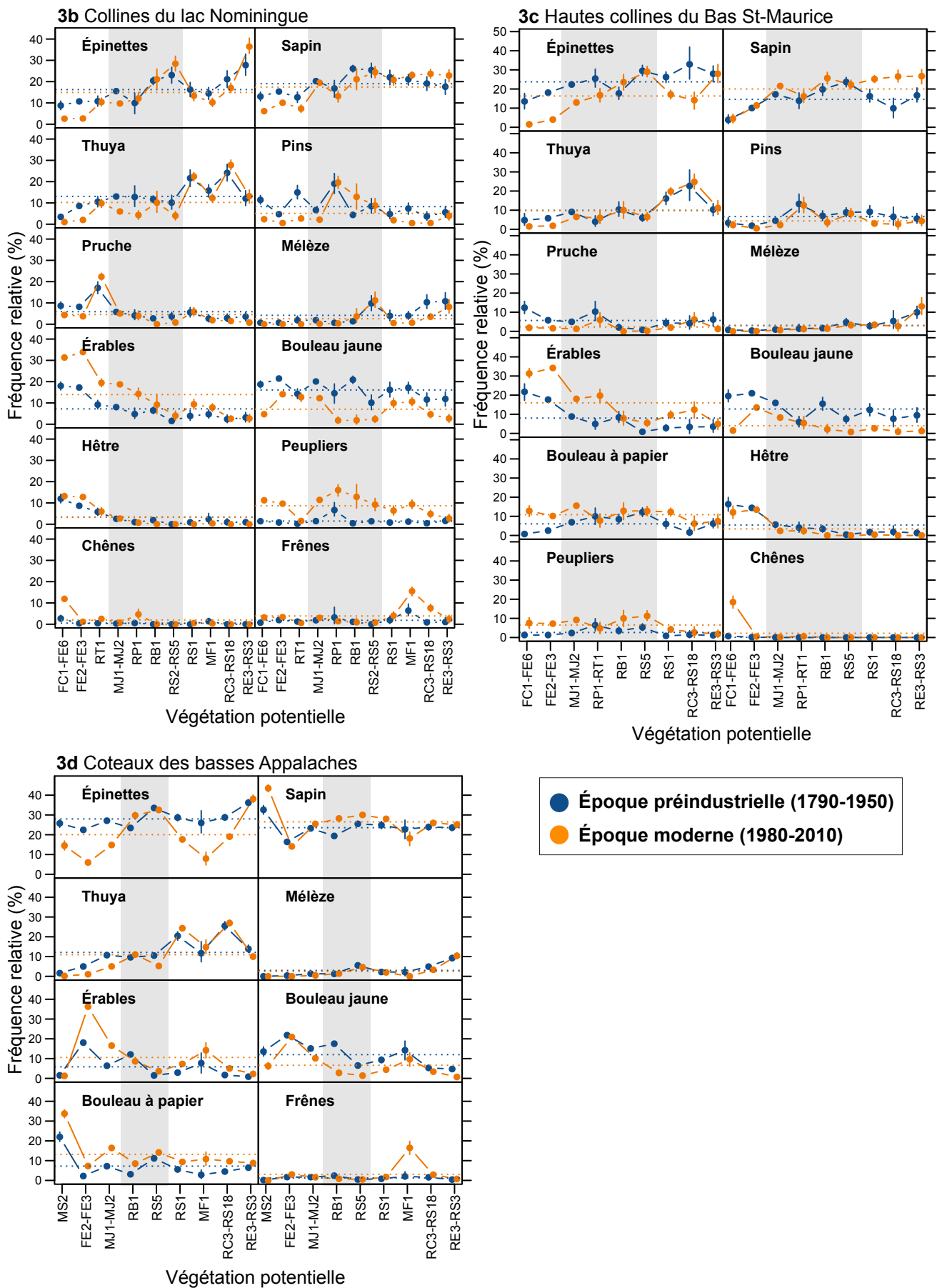


Figure 6. (suite)

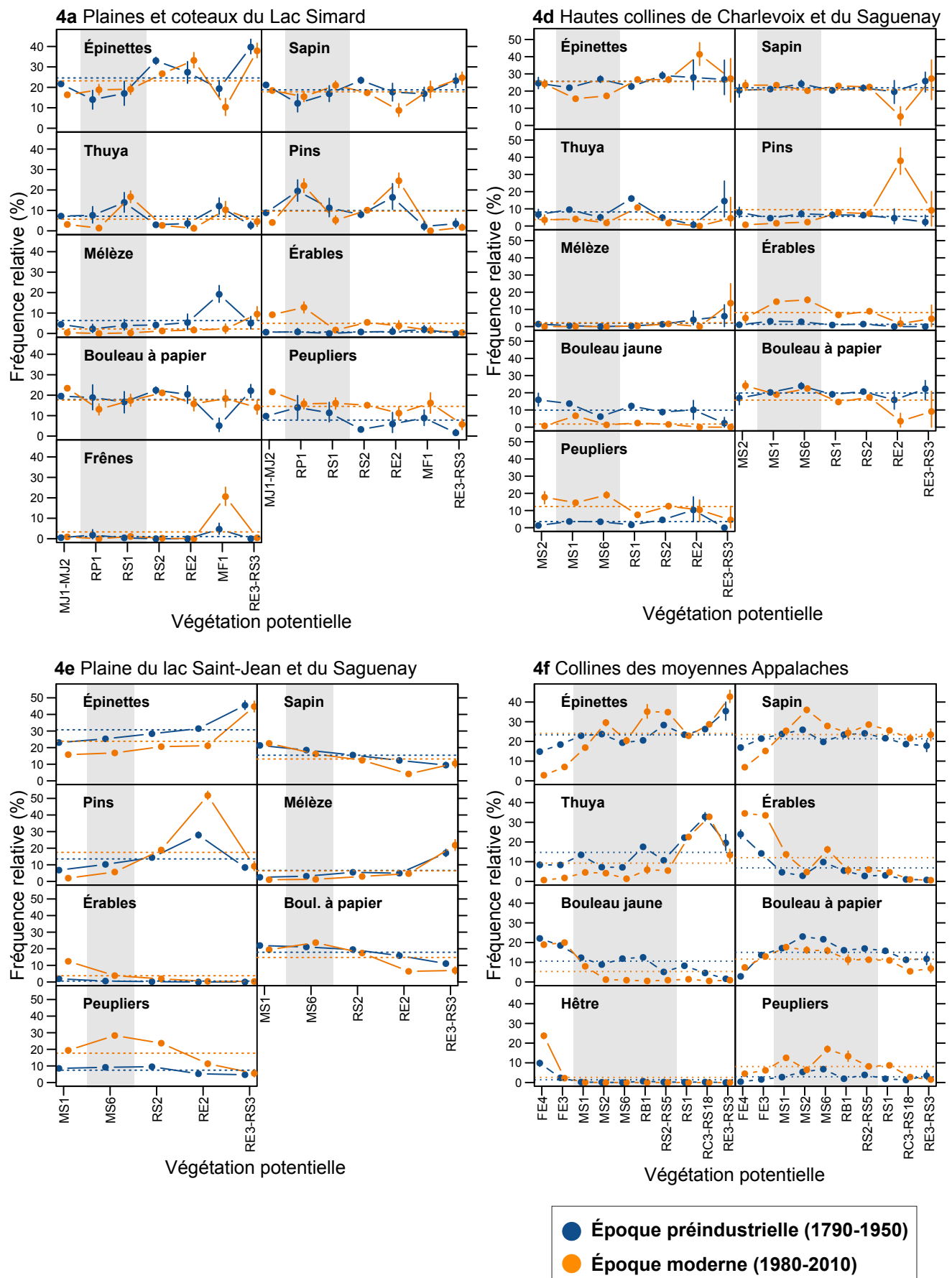


Figure 6. (suite)

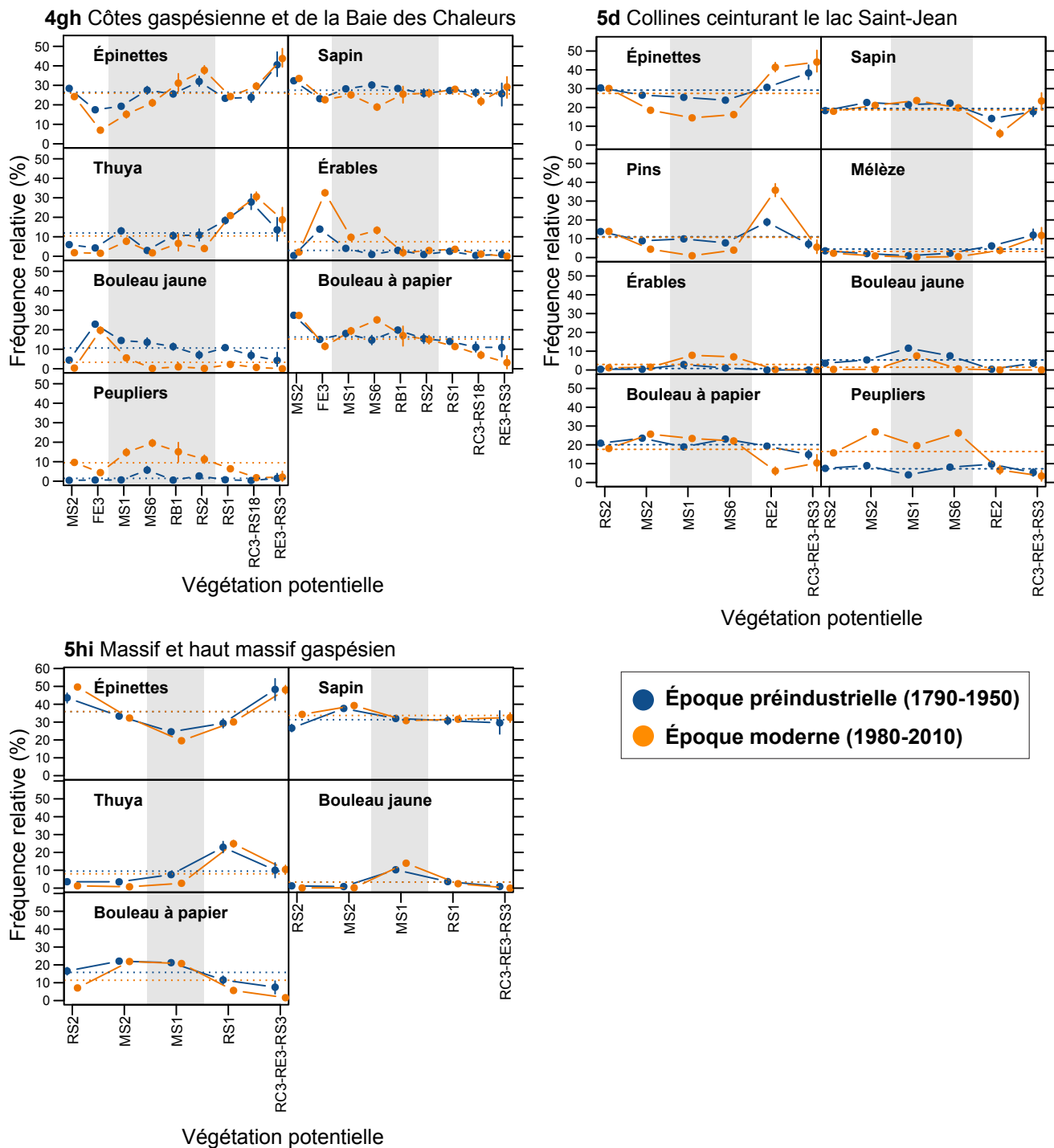


Figure 6. (suite et fin)

2.2. Changements de composition

Les résultats révèlent d'importants changements de composition entre les époques préindustrielle et moderne. Les plus fortes diminutions de fréquence relative ont été enregistrées pour les épinettes, le bouleau jaune, les pins et le thuya (moyennes de -6 %, -5 %, -4 % et -3 %, respectivement, pour

l'ensemble des régions écologiques; figure 3). Parallèlement, les érables et les peupliers ont augmenté le plus ($\approx +9$ %; figure 3). Bien que l'ensemble des régions écologiques suive cette tendance générale, on observe aussi d'importantes spécificités.

Les 7 régions écologiques du sud et de l'ouest (1a, 2a, 2b, 2c, 3a, 3b, 3c) ont subi les plus importants changements de composition, comme en témoigne la plus grande distance multivariée entre les compositions préindustrielle et actuelle que pour les autres régions écologiques (figure 7). En plus de la tendance générale décrite plus haut, on y observe une diminution des conifères et des feuillus qui caractérisaient ces régions écologiques à l'époque préindustrielle ($\approx -13\%$ pour les pins dans les régions 1a, 2a et 3a, jusqu'à -10% pour la pruche dans la région 2b et jusqu'à -10% pour le hêtre dans la région 2c; figure 3). Ces diminutions ont aussi été associées à une importante augmentation de la fréquence du sapin dans les régions écologiques appartenant aux sous-domaines bioclimatiques des érablières de l'Est ($\approx +13\%$ dans la région 2b et 2c), ainsi que du chêne rouge (*Quercus rubra* L.) dans les régions écologiques situées à l'extrême ouest ($\approx +5\%$ dans la région 1a, 2a et 3a). Le bouleau à papier a aussi augmenté dans certaines de ces régions écologiques ($\approx +5\%$ dans les régions 1a, 2a, 3a et 3b). La perte des spécificités de composition dans ces régions écologiques a engendré une homogénéisation dans l'ensemble du secteur, comme en témoigne la diminution de distance entre ces régions écologiques dans l'espace de l'ordination (figure 7). Les érables, et dans une moindre mesure le chêne rouge, y ont augmenté sur les

hauts (FC1-FE6, FE2) et milieux de pente (RP1-RT1, MJ1, MJ2), alors que la fréquence du sapin a surtout augmenté sur les milieux (MJ1, MJ2) et les bas de pente (MF1, RS1, RC3; figure 6). Les peupliers et le bouleau à papier ont eu tendance à augmenter sur l'ensemble de la toposéquence (figure 6). Bien que le thuya ait globalement diminué dans ces régions écologiques, il a aussi augmenté dans certaines végétations potentielles de bas de pente (RS1, RC3; figure 6).

Dans les autres régions écologiques, à l'exception du Massif Gaspésien (3d, 4a, 4f, 4gh, 5d), on observe des changements de composition qui suivent la tendance générale : diminution des épinettes, du bouleau jaune et du thuya, mais augmentation des érables et des peupliers (figure 3). Par rapport aux régions écologiques plus au sud et plus à l'ouest, ces changements ont aussi été de moindre importance (figures 3 et 7). La fréquence des érables a essentiellement augmenté sur les hauts de pente (FE2, FE3, FE6, RT1; figure 6). Dans les milieux de pente (MJ1, MJ2, MS1, MS6, RB1, RS1), la fréquence des peupliers a plutôt augmenté (figure 6). Finalement, dans ces régions écologiques, la composition a peu changé dans les bas de pente (RC3, RE3, RS3) (figure 6). Les zones de haute altitude du Massif Gaspésien (5hi), dominées par la forêt boréale, ont subi les plus faibles changements de composition (figures 3 et 7) : la fréquence des épinettes et du thuya a diminué sur les milieux de pente (MS1; figure 6), mais le bouleau à papier a aussi eu tendance à diminuer sur l'ensemble des végétations potentielles, et ce, contrairement à la tendance générale dans la région d'étude.

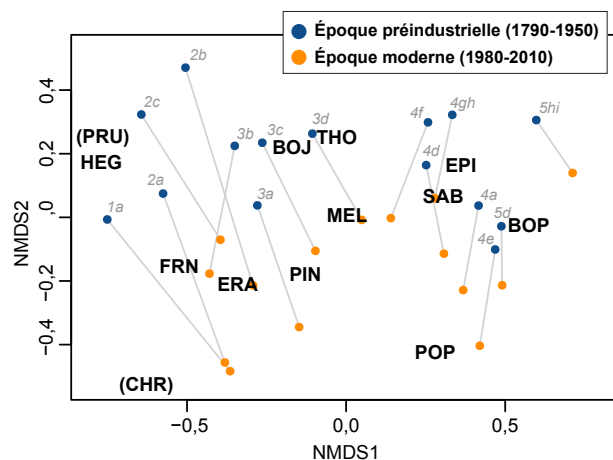


Figure 7. Ordination NMDS (*non-metric multidimensional scaling*) de la composition des régions écologiques à l'époque préindustrielle et moderne. Les variations dans la composition des régions écologiques aux deux époques ont été réduites en deux axes qui expliquent à eux deux plus de 65 % de la variance dans la fréquence des 13 taxons. Plus deux points sont distants dans l'espace de l'ordination, plus leur composition est différente. L'axe 1 de l'ordination représente surtout les gradients sud-nord et ouest-est dans la composition (48 % de la variance expliquée), alors que l'axe 2 représente surtout les différences de composition entre les deux époques (19 % de la variance expliquée). Les abréviations représentent les barycentres des 13 principaux taxons dans l'espace de l'ordination; EPI : épinettes, SAB : sapin, THO : thuya, PIN : pins, PRU : pruche, BOJ : bouleau jaune, BOP : bouleau à papier, ERA : érables, HEG : hêtre, POP : peupliers, FRN : frênes, CHR : chêne rouge, MEL : mélèze. La pruche et le chêne rouge sont entre parenthèses, car leur barycentre est en réalité à l'extérieur du cadre présenté ici (PRU : $-0,94$ et $0,26$ et CHR : $-0,66$ et $-0,95$ pour les axes 1 et 2 de l'ordination, respectivement).

Chapitre 3

Discussion

Nos résultats indiquent que les forêts pré-industrielles, à dominance résineuse et mixte (épinettes, sapin, bouleau jaune, bouleau à papier, thuya, pins, pruche), sont maintenant devenues des forêts dominées beaucoup plus par des essences feuillues, et dans lesquelles les taxons bien adaptés aux perturbations ont fortement augmenté ($\approx +20\%$ pour les érables et peupliers pris ensemble). Ces résultats sont en accord avec les nombreuses études précédentes réalisées au Québec avec d'autres sources de données (Barrette et Bélanger 2007, Barrette *et al.* 2010, Bouchard *et al.* 1989, Boucher *et al.* 2009, Boucher *et al.* 2014, Domon et Bouchard 2007, Simard et Bouchard 1996) et dans les régions adjacentes des États-Unis et de l'Ontario (Bürgi *et al.* 2000, Cogbill *et al.* 2002, Jackson *et al.* 2000, Lorimer 1977, Pinto *et al.* 2008, Siccama 1971, Thompson *et al.* 2013, Whitney 1994). Cependant, notre analyse à une échelle plus large apporte une vision d'ensemble inédite de la composition préindustrielle et des changements de composition survenus depuis dans le sud du Québec.

3.1. Variations dans la composition préindustrielle

À l'échelle régionale, la composition suivait de près les conditions climatiques le long des gradients latitudinaux et altitudinaux (Goldblum *et al.* 2010, Goldblum et Rigg 2010). On trouvait au sud une composition plus diversifiée, plus mixte et avec une importante proportion de taxons résineux et feuillus tempérés (pruche, pins, érables, hêtre) et une plus faible proportion d'épinettes et de sapin par rapport au reste de la région d'étude. Bien que les données d'arpentage ne permettent pas de différencier les espèces d'épinettes, il semble plus vraisemblable que l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss.) et l'épinette rouge (*Picea rubens* Sarg.) aient été les plus abondantes dans ces régions écologiques plus chaudes (annexe 4). Le bouleau jaune et le thuya étaient les plus abondants dans les régions écologiques associées à la transition entre climat tempéré et boréal (érablières et sapinière à bouleau jaune). Plus au nord, la diversité diminuait vers une composition dominée par 3 taxons boréaux : les épinettes, le sapin et le bouleau à papier. Dans ces régions écologiques plus nordiques, il est vraisemblable

que l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) tenait une place plus importante dans la fréquence totale des épinettes, voire dominante dans certains territoires (p. ex. région écologique 4a; Danneyrolles *et al.* 2016a).

Nos résultats font également ressortir un important gradient ouest-est dans la composition des forêts préindustrielles. Les pins (vraisemblablement le pin blanc et le pin rouge; annexe 4) dominaient les régions écologiques à l'ouest de la rivière Gatineau et étaient très abondants (vraisemblablement le pin gris) dans la zone du lac Saint-Jean (annexe 4), alors que les épinettes dominaient dans les régions écologiques plus à l'est. La fréquence du thuya augmentait aussi d'ouest en est. Ces variations pourraient être liées aux différences physiologiques entre les espèces. À l'ouest, le Bouclier canadien, avec ses caractéristiques édaphiques sableuses, son sol bien drainé et acide, et ses conditions climatiques plus continentales et sèches (Robitaille et Saucier 1998), était vraisemblablement plus favorable aux pins. Inversement, à l'est, les basses-terres du Saint-Laurent et la chaîne des Appalaches, avec leurs sols à texture plus fine et à teneur plus élevée en calcium et leurs conditions climatiques plus humides, offraient des conditions possiblement plus propices au développement des épinettes et du thuya (Danneyrolles *et al.* 2017). Des contrastes dans les régimes de perturbations pourraient aussi expliquer l'existence d'un gradient est-ouest dans la composition des forêts préindustrielles. En effet, les régions écologiques de l'ouest étaient soumises à des feux relativement fréquents, en raison de conditions climatiques plus sèches (Bergeron *et al.* 2006, Drever *et al.* 2006, Grenier *et al.* 2005), ce qui aurait favorisé des conifères adaptés aux feux comme les pins ou l'épinette noire (Danneyrolles *et al.* 2016a, 2018). Inversement, plus à l'est, la dynamique des forêts était principalement contrôlée par des perturbations partielles comme les épidémies d'insectes et les chablis (Boucher *et al.* 2009, Lorimer et White 2003, Payette *et al.* 2017), ce qui aurait favorisé des conifères de fin de succession (épinette blanche, épinette rouge, thuya, pruche; Danneyrolles *et al.* 2017, Dupuis *et al.* 2011).

À l'échelle du paysage, on observait aussi une importante variation de la composition le long des

toposéquences de chaque région écologique. Les peuplements des bas de pente aux sols profonds, généralement moins bien drainés, étaient majoritairement résineux (sapinières, pessières, cédrières). Inversement, les milieux et hauts de pente aux sols peu profonds et mieux drainés étaient occupés par des peuplements mixtes et feuillus (érablières et bétulaies mixtes; Barras et Kellman 1998, Boucher *et al.* 2009, Danneyrolles *et al.* 2016b, Dupuis *et al.* 2011, Laflamme *et al.* 2016).

3.2. Changements de composition : causes et tendances

Entre les époques préindustrielle et moderne, nos résultats témoignent globalement d'une importante réduction des essences résineuses ($\approx -15\%$ pour les épinettes, le thuya, les pins et la pruche pris ensemble) et des feuillus tolérants ($\approx -9\%$ pour le bouleau jaune et le hêtre pris ensemble). Cette diminution peut s'expliquer par la combinaison de deux principaux facteurs (Boucher *et al.* 2006, Danneyrolles *et al.* 2016a, 2019, Dupuis *et al.* 2011, Laflamme *et al.* 2016) : 1) un prélèvement sélectif intensif des résineux (bois d'œuvre, pâte à papier, etc.) et 2) la sensibilité de ces taxons aux perturbations (feux, défrichements, coupes, etc.). Parallèlement, on observe une forte augmentation des feuillus intolérants (peupliers, bouleau à papier, érable rouge), mais également d'essences plus tolérantes comme l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) et le sapin.

Les érables ont connu la plus forte expansion dans l'ensemble des régions écologiques (sauf dans les hautes altitudes du Massif et haut massif gaspésien; région 5hi). Cette augmentation s'est concentrée sur les hauts et les milieux de pente, où ils étaient déjà plus présents à l'époque préindustrielle. Nos analyses ne permettent toutefois pas de discerner l'érable à sucre de l'érable rouge (*Acer rubrum* L.). Cependant, un examen rapide de la répartition actuelle de ces essences (annexe 4) montre d'importantes tendances géographiques. La fréquence de l'érable rouge a vraisemblablement augmenté sur l'ensemble de la région d'étude, mais tout particulièrement sur les basses terres du Saint-Laurent où le couvert forestier est aujourd'hui largement fragmenté par l'agriculture. Cette essence opportuniste de début de succession (Abrams 1998, Fei et Steiner 2007, 2009, Walter et Yawney 1991) a donc clairement profité des profonds changements d'usages des sols dans ces zones (p. ex. : mise en culture et abandon des terres; Domon et Bouchard 2007, Thompson *et al.* 2013), mais également de perturbations de moindre intensité dans le reste de la région d'étude. L'érable à sucre a aussi

augmenté sur l'ensemble de la région d'étude, mais plus particulièrement sur les régions écologiques des Collines de la basse Gatineau et des Collines du lac Nominique, où cette essence est actuellement la plus abondante (annexe 4). L'érable à sucre est généralement considéré comme une essence de fin de succession très tolérante à l'ombre (Godman *et al.* 1991) et sa capacité à maintenir une abondante banque de semis sous couvert lui donne un fort avantage compétitif après des ouvertures partielles de la canopée (p. ex. : coupes partielles, épidémies d'insecte; Boucher *et al.* 2006, Danneyrolles *et al.* 2016b). Cependant, l'espèce fait aussi preuve d'une grande amplitude écologique qui lui permet de maintenir sa dominance après des perturbations majeures comme les feux ou les coupes totales (Nolet *et al.* 2008, Pilon et Payette 2015, Pilon *et al.* 2018). L'érable à sucre et l'érable rouge ont donc autant pu profiter des perturbations partielles et de plus forte intensité engendrées par la colonisation et l'industrialisation.

Les feuillus intolérants, les peupliers (principalement le peuplier faux-tremble [*Populus tremuloides* Michx.]; annexe 4) et le bouleau à papier ont beaucoup augmenté dans la région d'étude. La multiplication par drageonnement du peuplier faux-tremble rend celui-ci particulièrement bien adapté aux perturbations majeures ou fréquentes (Bergeron et Charron 1994, Boucher *et al.* 2014, Danneyrolles *et al.* 2016a). Le bouleau à papier, autant par ses capacités de régénération par semis que par rejets de souche, a également été favorisé par les perturbations partielles ou majeures dans certaines régions écologiques (Grondin et Simon 2003, Safford *et al.* 1991). Généralement, ces essences se sont développées sur l'ensemble des toposéquences, sauf dans les bas de pente mal drainés. Cependant, la distribution actuelle de ces deux espèces à l'échelle du paysage peut aussi être très différente, selon l'historique des perturbations dans un lieu donné. Les peupliers (principalement le peuplier faux-tremble) ont surtout augmenté dans les zones très touchées par la colonisation, où la combinaison de conditions environnementales favorables (dépôts glaciolacustres argileux dans les basses terres) et de perturbations majeures (feux d'abattis, mise en culture des terres) leur ont été particulièrement favorables (Danneyrolles *et al.* 2016a, Terrail *et al.* 2019). Inversement, le bouleau à papier a plutôt augmenté dans les zones de moyenne ou de haute altitude qui ont subi des coupes (Terrail *et al.* 2019), mais il a aussi diminué dans certaines zones à l'est où il était particulièrement fréquent à l'époque préindustrielle. Cette diminution pourrait être attribuée à une baisse de la fréquence des feux depuis le début du

XX^e siècle (Drobyshev *et al.* 2017, Pinna *et al.* 2009) ainsi qu'aux épisodes de dépérissement du bouleau observés depuis cette période (Auclair *et al.* 1996, Bouchard *et al.* 2006, 2007, Braathe 1995).

Le sapin baumier est la seule essence résineuse dont l'abondance s'est maintenue ou a augmenté depuis l'époque préindustrielle. Bien que cette essence soit considérée comme très tolérante à l'ombre et sensible aux perturbations (particulièrement aux feux; Franck 1990), sa capacité à maintenir une forte densité de régénération en sous-étage (Doyon et Bouffard 2009, Greene *et al.* 1999, Morin et Laprise 1997) lui permet de se développer rapidement après la suppression du couvert supérieur par les coupes ou les épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* (Clemens); Bouchard *et al.* 2006, Morin 1994, Morin et Laprise 1997). De plus, l'augmentation du sapin s'est généralement faite dans les milieux et les bas de pente, au détriment d'essences résineuses à plus forte valeur commerciale (épinettes, pruche, pins) qui ont fait l'objet de prélèvements intensifs par l'industrie. La sélection préférentielle de ces essences a donc conféré un avantage certain au

sapin. La diminution de l'activité des feux depuis l'époque préindustrielle (Drobyshev *et al.* 2017) pourrait aussi en partie expliquer l'augmentation du sapin, particulièrement dans la partie ouest de la région d'étude où cette essence a augmenté au détriment de celles adaptées au feu comme les pins et l'épinette noire (Danneyroles *et al.* 2016a, 2016b).

Le chêne rouge a augmenté sur une importante proportion des hauts de pente du sud-ouest de la zone d'étude. Cette espèce est généralement considérée comme dépendante de la récurrence des feux, qui lui confère une dynamique cyclique et lui permet de se régénérer (Abrams 1992). Les décennies de la fin du 19^e et du début du 20^e siècle ont été particulièrement propices au feu dans l'ouest du Québec, en raison d'un climat très sec et probablement aussi de la colonisation (Drever *et al.* 2006, Drobyshev *et al.* 2017, Grenier *et al.* 2005, Lefort *et al.* 2003). Le développement des chênaies sur les hauts de pente dans ces régions écologiques est donc probablement une conséquence des feux de cette époque et des coupes sélectives des conifères auparavant présents sur ces sites (pins, pruche; Laflamme *et al.* 2016).

Conclusion et implications pour l'aménagement

Nos résultats viennent enrichir la connaissance de l'historique de la végétation des forêts tempérées du Québec et dépeignent des changements importants des forêts préindustrielles, à dominance résineuse et mixte (épinettes, sapin, bouleau jaune, thuya, pins, pruche), vers les forêts actuelles dominées beaucoup plus par les feuillus et dans lesquelles les érables et les peupliers ont fortement augmenté. À l'époque préindustrielle, les régions écologiques montraient plus de différences de composition qu'aujourd'hui, et leur composition se structurait le long des toposéquences. Cependant, à l'époque préindustrielle, la composition différait fortement de la composition de fin de succession estimée pour plusieurs types de végétations potentielles, particulièrement dans les forêts décidues et mélangées des hauts et des milieux de pente. Les résultats de la présente étude témoignent donc de l'altération des trajectoires dynamiques causée par les activités humaines (feux liés à la colonisation, coupes forestières; Boucher *et al.* 2006). Par ailleurs, les données historiques de la présente étude, avec d'autres travaux réalisés dans le domaine de la paléoécologie (Hennebelle *et al.* 2018), permettent d'améliorer notre compréhension des végétations potentielles et tout particulièrement l'influence des activités anthropiques. Ces études doivent se poursuivre afin de bonifier le concept, la connaissance et l'utilisation des végétations potentielles dans l'aménagement forestier.

L'utilisation couplée de données historiques et de la classification écologique offre un cadre méthodologique solide pour mieux déterminer les cibles de composition pour l'aménagement écosystémique (Laflamme *et al.* 2016). Les résultats permettent de définir des espèces cibles à l'échelle régionale (p. ex. : le thuya et les épinettes dans la région écologique 4f), et ensuite, à une échelle plus fine, de déterminer sur quels types de sites il faudrait concentrer les efforts de restauration (p. ex. : les végétations potentielles FE4, FE3, MS1). Cependant, la prise en compte des enjeux de résilience des forêts aux changements climatiques futurs est également essentielle. Dans certaines régions écologiques, les changements climatiques pourraient aussi largement compromettre l'atteinte des cibles déterminées par la composition préindustrielle (Boulanger *et al.* 2019). Dans un tel cas de figure, les données historiques devraient être utilisées pour établir des cibles fonctionnelles (p. ex. : fréquence des espèces longévives et tolérantes à l'ombre) plutôt que spécifiques (Boulanger *et al.* 2019). Ces résultats procurent donc aux aménagistes des états de référence pour s'attaquer aux enjeux de composition. Toutefois, ceux-ci doivent être utilisés tout en tenant compte des enjeux économiques et sociaux propres à chaque région écologique.

Références bibliographiques

- Abrams, M.D., 1992. *Fire and the development of oak forests: In eastern North America, oak distribution reflects a variety of ecological paths and disturbance conditions*. *BioScience* 42(5) : 346–353. <https://doi.org/10.2307/1311781>
- Abrams, M.D., 1998. *The red maple paradox: What explains the widespread expansion of red maple in eastern forests?* *BioScience* 48(5): 355–364. <https://doi.org/10.2307/1313374>
- Auclair, A.N.D., J.T. Lill et C. Revenga, 1996. *The role of climate variability and global warming in the dieback of northern Hardwoods*. *Water, Air, Soil Pollut.* 91: 163–186. <https://doi.org/10.1007/BF00666255>
- Barras, N. et M. Kellman, 1998. *The supply of regeneration micro-sites and segregation of tree species in a hardwood/boreal forest transition zone*. *J. Biogeogr.* 25(5): 871–881. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.1998.00232.x>
- Barrette, M. et L. Bélanger, 2007. *Reconstitution historique du paysage préindustriel de la région écologique des hautes collines du Bas-Saint-Maurice*. *Can. J. For. Res.* 37(7): 1147–1160. <https://doi.org/10.1139/X06-306>
- Barrette, M., L. Bélanger et L. De Grandpré, 2010. *Preindustrial reconstruction of a perhumid mid-boreal landscape, Anticosti Island, Quebec*. *Can. J. For. Res.* 40(5): 928–942. <https://doi.org/10.1139/X10-040>
- Bergeron, J.-F., J.-P. Saucier, D. Robert et A. Robitaille, 1992. *Québec forest ecological classification program*. *For. Chron.* 68(1): 53–63. <https://doi.org/10.5558/tfc68053-1>
- Bergeron, Y. et D. Charron, 1994. *Postfire stand dynamics in a southern boreal forest (Québec): A dendroecological approach*. *Écoscience* 1(2): 173–184. <https://doi.org/10.1080/11956860.1994.11682241>
- Bergeron, Y., D. Cyr, C.R. Drever, M. Flannigan, S. Gauthier, D. Kneeshaw, É. Lauzon, A. Leduc, H. Le Goff, D. Lesieur et K. Logan, 2006. *Past, current, and future fire frequencies in Quebec's commercial forests: Implications for the cumulative effects of harvesting and fire on age-class structure and natural disturbance-based management*. *Can. J. For. Res.* 36(11): 2737–2744. <https://doi.org/10.1139/x06-177>
- Bouchard, A., S. Dyrda, Y. Bergeron et A. Meilleur, 1989. *The use of notary deeds to estimate the changes in the composition of 19th century forests, in Haut-Saint-Laurent, Quebec*. *Can. J. For. Res.* 19(9): 1146–1150. <https://doi.org/10.1139/x89-173>
- Bouchard, M., Y. Boucher, A. Belleau, et Y. Boulanger, 2015. *Modélisation de la variabilité naturelle de la structure d'âge des forêts du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 175. 32 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Bouchard-Mathieu/Memoire175.pdf>
- Bouchard, M., D. Kneeshaw et Y. Bergeron, 2006. *Forest dynamics after successive spruce budworm outbreaks in mixedwood forests*. *Ecology* 87(9): 2319–2329. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[2319:FDASSB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[2319:FDASSB]2.0.CO;2)
- Bouchard, M., D. Kneeshaw et C. Messier, 2007. *Forest dynamics following spruce budworm outbreaks in the northern and southern mixedwoods of central Quebec*. *Can. J. For. Res.* 37(4): 763–772. <https://doi.org/10.1139/X06-278>
- Boucher, Y., D. Arseneault et L. Sirois, 2006. *Logging-induced change (1930–2002) of a preindustrial landscape at the northern range limit of northern hardwoods, eastern Canada*. *Can. J. For. Res.* 36(2): 505–517. <https://doi.org/10.1139/x05-252>
- Boucher, Y., D. Arseneault, L. Sirois et L. Blais, 2009. *Logging pattern and landscape changes over the last century at the boreal and deciduous forest transition in eastern Canada*. *Landsc. Ecol.* 24(2): 171–184. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9294-8>
- Boucher, Y., M. Bouchard, P. Grondin et P. 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 Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 161. 40 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/amenagement/registre-etats-reference.pdf>

- Boucher, Y., P. Grondin et I. Auger, 2014. *Land use history (1840–2005) and physiography as determinants of southern boreal forests*. *Landsc. Ecol.* 29(3): 437–450. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9974-x>
- Boulanger, Y., D. Arseneault, Y. Boucher, S. Gauthier, D. Cyr, A.R. Taylor, D.T. Price et S. Dupuis, 2019. *Climate change will affect the ability of forest management to reduce gaps between current and presettlement forest composition in southeastern Canada*. *Landsc. Ecol.* 34: 159–174. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0761-6>
- Braathe, P., 1995. *Birch dieback - caused by prolonged early spring thaws and subsequent frost*. *Nor. J. Agric. Sci.* 20(Suppl.): 1–59.
- Bürgi, M., E.W.B. Russel et G. Motzkin, 2000. *Effects of postsettlement human activities on forest composition in the north-eastern United States: A comparative approach*. *J. Biogeogr.* 27(5): 1123–1138. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2000.00484.x>
- Choi, Y.D., V.M. Temperton, E.B. Allen, A.P. Grootjans, M. Halassy, R.J. Hobbs, M.A. Naeth et K. Torok, 2008. *Ecological restoration for future sustainability in a changing environment*. *Ecoscience* 15(1): 53–64. [https://doi.org/10.2980/1195-6860\(2008\)15\[53:ERFFSI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2980/1195-6860(2008)15[53:ERFFSI]2.0.CO;2)
- Cogbill, C.V., J. Burk et G. Motzkin, 2002. *The forests of presettlement New England, USA: Spatial and compositional patterns based on town proprietor surveys*. *J. Biogeogr.* 29(10–11): 1279–1304. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2002.00757.x>
- Comité d'experts sur l'aménagement écosystémique des forêts et les changements climatiques, 2017. *L'aménagement écosystémique des forêts dans le contexte des changements climatiques*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Rapport du comité d'experts. 29 p. <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2796415>
- Danneyrolles, V., D. Arseneault et Y. Bergeron, 2016a. *Pre-industrial landscape composition patterns and post-industrial changes at the temperate-boreal forest interface in western Quebec, Canada*. *J. Veg. Sci.* 27(3): 470–481. <https://doi.org/10.1111/jvs.12373>
- Danneyrolles, V., D. Arseneault et Y. Bergeron, 2016b. *Long-term compositional changes following partial disturbance revealed by the re-survey of logging concession limits in the northern temperate forest of eastern Canada*. *Can. J. For. Res.* 46(7): 943–949. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0047>
- Danneyrolles, V., D. Arseneault et Y. Bergeron, 2018. *Anthropogenic disturbances strengthened tree community-environment relationships at the temperate-boreal interface*. *Landsc. Ecol.* 33(2): 213–224. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0591-y>
- Danneyrolles, V., S. Dupuis, D. Arseneault, R. Terrail, M. Leroyer, A. de Römer, G. Fortin, Y. Boucher et J.-C. Ruel, 2017. *Eastern white cedar long-term dynamics in eastern Canada: Implications for restoration in the context of ecosystem-based management*. *For. Ecol. Manage.* 400: 502–510. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.024>
- Danneyrolles, V., S. Dupuis, G. Fortin, M. Leroyer, A. de Römer, R. Terrail, M. Vellend, Y. Boucher, J. Laflamme, Y. Bergeron, et D. Arseneault, 2019. *Stronger influence of anthropogenic disturbance than climate change on century-scale compositional changes in northern forests*. *Nature Commun.* 10(1): 1265. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09265-z>
- Davis, L.S., K.N. Johnson, P. Bettinger et T.E. Howard, 2005. *Forest management: To sustain ecological, economic, and social value*. In 4th ed. Waveland Press. Long Grove, IL (États-Unis). 804 p.
- Domon, G. et A. Bouchard, 2007. *The landscape history of Godmanchester (Quebec, Canada): Two centuries of shifting relationships between anthropic and biophysical factors*. *Landsc. Ecol.* 22(8): 1201–1214. <https://doi.org/10.1007/s10980-007-9100-z>
- Doyon, F. et D. Bouffard, 2009. *Enjeux écologiques de la forêt feuillue tempérée québécoise*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de l'environnement et de la protection des forêts. 70 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/amenagement/enjeu-foret-feuille.pdf>
- Drever, C. R., C. Messier, Y. Bergeron et F. Doyon, 2006. *Fire and canopy species composition in the Great Lakes-St. Lawrence forest of Témiscamingue, Québec*. *For. Ecol. Manage.* 231(1–3): 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.04.039>

- Drobyshev, I., Y. Bergeron, M.P. Girardin, S. Gauthier, C. Ols et J. Ojal, 2017. *Strong gradients in forest sensitivity to climate change revealed by dynamics of forest fire cycles in the post Little Ice Age era: Forest fires in post LIA era*. J. Geophys. Res.: Biogeosci. 122(10): 2605–2616. <https://doi.org/10.1002/2017JG003826>
- Dupuis, S., D. Arseneault et L. Sirois, 2011. *Change from pre-settlement to present-day forest composition reconstructed from early land survey records in eastern Québec, Canada*. J. Veg. Sci. 22(3): 564–575. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01282.x>
- Egan, D. et E.A. Howell, 2001. *The historical ecology handbook: A restorationist's guide to reference ecosystems*. Island Press, Washington, D.C. (États-Unis). 488 p.
- Fei, S. et K.C. Steiner, 2007. *Evidence for increasing red maple abundance in the eastern United States*. For. Sci. 53(4): 473–477.
- Fei, S. et K.C. Steiner, 2009. *Rapid capture of growing space by red maple*. Can. J. For. Res. 39(8): 1444–1452. <https://doi.org/10.1139/X09-065>
- Fick, S.E. et R.J. Hijmans, 2017. *WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas*. Int. J. Climatol. 37(12): 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Frank, R.M., 1990. « *Abies balsamea (L.) Mill. Balsam Fir*. » Dans : Burns, R.M. et B.H. Honkala (éds.). *Silvics of North America*. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Agriculture Handbook n° 654. Washington, D.C. (États-Unis). https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag_654/volume_1/abies/balsamea.htm
- Gagné, L., L. Sirois et L. Lavoie, 2016. « Forest management and climate change: Adaptive measures for the temperate–boreal interface of eastern North America. » Dans : Larocque, G. (éd.). *Ecological forest management handbook*. CRC Press. Boca Raton, FL (États-Unis). p. 561–587.
- Gauthier, S., M.-A. Vaillancourt, A. Leduc, L. De Grandpré, D. Kneeshaw, H. Morin, P. Drapeau et Y. Bergeron, 2009. *Ecosystem management in the boreal forest*. Presses de l'Université du Québec, 392 p.
- Godman, R.M., H.W. Yawney et H.T. Tubbs, 1991. « *Acer saccharum* Marsh. Sugar Maple. » Dans : Burns, R.M. et B.H. Honkala (éds.). *Silvics of North America*. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Agriculture Handbook n° 654. Washington, D.C. (États-Unis). https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag_654/volume_2/acer/saccharum.htm
- Goldblum, D. et L.S. Rigg, 2010. *The deciduous forest - boreal forest ecotone*. Geogr. Compass 4(7): 701–717. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00342.x>
- Goldblum, D., L.S. Rigg et J.M. Napoli, 2010. *Environmental determinants of tree species distributions in central Ontario, Canada*. Phys. Geogr. 31(5): 423–440. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.31.5.423>
- Gosselin, J., J.-P. Berger et Direction des inventaires forestiers, 2007. *Les guides de reconnaissance des types écologiques*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction des inventaires forestiers <https://mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/guide-types-ecologiques-carte.jsp>
- Greene, D. F., J.C. Zasada, L. Sirois, D. Kneeshaw, H. Morin, I. Charron et M.-J. Simard, 1999. *A review of the regeneration dynamics of North American boreal forest tree species*. Can. J. For. Res. 29(6): 824–839. <https://doi.org/10.1139/x98-112>
- Grenier, D.J., Y. Bergeron, D. Kneeshaw et S. Gauthier, 2005. *Fire frequency for the transitional mixedwood forest of Timiskaming, Quebec, Canada*. Can. J. For. Res. 35(3): 656–666. <https://doi.org/10.1139/x05-005>
- Grenon, F., J.-P. Jetté et M. Leblanc, 2010. *Manuel de référence pour l'aménagement écosystémique des forêts au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de l'environnement et de la protection des forêts. 60 p. http://www.cerfo.qc.ca/fileadmin/mediatheque/actualite/manuel_aef_Module_1.pdf
- Grondin, P. et A. Cimon, 2003. *Les enjeux de biodiversité relatifs à la composition forestière*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière et Direction de l'environnement forestier. 216 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/enjeux-2003-3070.pdf>

- Grondin, P., S. Gauthier, V. Poirier, P. Tardif, Y. Boucher et Y. Bergeron, 2018. *Have some landscapes in the eastern Canadian boreal forest moved beyond their natural range of variability?* For. Ecosyst. 5(30). <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0148-9>
- Hennebelle, A., P. Grondin, J.C. Aleman, A.A. Ali, Y. Bergeron, D. Borcard et O. Blarquez, 2018. *Using paleoecology to improve reference conditions for ecosystem-based management in western spruce-moss subdomain of Québec.* For. Ecol. Manage. 430: 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.007>
- Higgs, E., D.A. Falk, A. Guerrini, M. Hall, J. Harris, R.J. Hobbs, S.T. Jackson, J.M. Rhemtulla et W. Throop, 2014. *The changing role of history in restoration ecology.* Front. Ecol. Environ. 12(9): 499–506. <https://doi.org/10.1890/110267>
- Jackson, S.M., F. Pinto, J.R. Malcolm et E.R. Wilson, 2000. *A comparison of pre-European settlement (1857) and current (1981–1995) forest composition in central Ontario.* Can. J. For. Res. 30(4): 605–612. <https://doi.org/10.1139/x99-242>
- Jackson, S.T. et R.J. Hobbs, 2009. *Ecological restoration in the light of ecological history.* Science 325(5940): 567–569. <https://doi.org/10.1126/science.1172977>
- Kneeshaw, D. D. et Y. Bergeron, 2016. « Applying knowledge of natural disturbance regimes to develop an ecosystem management approach in forestry. » Dans : Larocque, G. (éd.). *Ecological forest management handbook.* CRC Press. Boca Raton, FL (États-Unis). p. 3-31.
- Kohm, K.A. et J.F. Franklin, 1997. *Creating a forestry for the 21st century: The science of ecosystem management.* Island Press. Washington, D.C. (États-Unis). 496 p.
- Laflamme, J., A. Munson, P. Grondin et D. Arseneault, 2016. *Anthropogenic disturbances create a new vegetation toposequence in the Gatineau River Valley, Quebec.* Forests 7(11): 254. <https://doi.org/10.3390/f7110254>
- Larocque, G.R., 2016. *Ecological forest management handbook.* CRC Press. Boca Raton, FL (États-Unis). 640 p. <https://doi.org/10.1201/b19150>
- Lefort, P., S. Gauthier et Y. Bergeron, 2003. *The Influence of fire weather and land use on the fire activity of the Lake Abitibi area, eastern Canada.* For. Sci. 49(4): 509–521.
- Legendre, P. et M. De Cáceres, 2013. *Beta diversity as the variance of community data: Dissimilarity coefficients and partitioning.* Ecol. Lett. 16(8): 951–963. <https://doi.org/10.1111/ele.12141>
- Lindenmayer, D. et J.F. Franklin, 2002. *Conserving forest biodiversity: A comprehensive multiscaled approach.* Island Press. Washington, D.C. (États-Unis). 352 p.
- Lorimer, C.G., 1977. *The presettlement forest and natural disturbance cycle of northeastern Maine.* Ecology 58(1): 139–148. <https://doi.org/10.2307/1935115>
- Lorimer, C.G. et A.S. White, 2003. *Scale and frequency of natural disturbances in the northeastern US: Implications for early successional forest habitats and regional age distributions.* For. Ecol. Manage. 185(1–2): 41–64. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00245-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00245-7)
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2016. *Placettes-échantillons temporaires : normes techniques placettes-échantillons temporaires.* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 188 p. <http://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2748267>
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2018. *Cartographie du 5^e inventaire écoforestier du Québec méridional : méthodes et données associées.* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 111 p. <http://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/3466439>
- Millar, C.I., N.L. Stephenson et S.L. Stephens, 2007. *Climate change and the forests of the future: Managing in the face of uncertainty.* Ecol. Appl. 17(8): 2145–2151. <https://doi.org/10.1890/06-1715.1>
- Morin, H., 1994. *Dynamics of balsam fir forests in relation to spruce budworm outbreaks in the boreal zone of Quebec.* Can. J. For. Res. 24(4): 730–741. <https://doi.org/10.1139/x94-097>
- Morin, H. et D. Laprise, 1997. *Seedling bank dynamics in boreal balsam fir forests.* Can. J. For. Res. 27(9): 1442–1451. <https://doi.org/10.1139/x97-113>
- [MRN] Ministère des Ressources naturelles, 2013. *Le guide sylvicole du Québec, Tome 1. Les fondements biologiques de la sylviculture,* ouvrage collectif sous la supervision de B. Boulet et M. Huot, Les publications du Québec, 1044 p.

- Nolet, P., S. Delagrangé, D. Bouffard, F. Doyon et E. Forget, 2008. *The successional status of sugar maple (Acer saccharum), revisited*. Ann. For. Sci. 65(2): 208. <https://doi.org/10.1051/forest:2007091>
- Oksanen, J., F.G. Blanchet, M. Friendly, R. Kindt, P. Legendre, D. McGlinn, P.R. Minchin, R.B. O'Hara, G.L. Simpson, P. Solymos, M.H.H. Stevens, E. Szoecs, et H. Wagner, 2017. *Vegan: Community ecology package*. Archive de fichiers. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Payette, S., V. Pilon, P.-L. Couillard et J. Laflamme, 2017. *Fire history of Appalachian Forests of the lower St-Lawrence region (southern Quebec)*. Forests 8(4): 120. <https://doi.org/10.3390/f8040120>
- Périé, C. et S. de Blois, 2016. *Dominant forest tree species are potentially vulnerable to climate change over large portions of their range even at high latitudes*. PeerJ 4: e2218. <https://doi.org/10.7717/peerj.2218>
- Périé, C., S. de Blois, M.-C. Lambert et N. Casajus, 2014. *Effets anticipés des changements climatiques sur l'habitat des espèces arborescentes au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 173. 66 p. <http://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2331851>
- Pilon, V. et S. Payette, 2015. *Sugar maple (Acer saccharum) forests at their northern distribution limit are recurrently impacted by fire*. Can. J. For. Res. 45(4): 452–462. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0322>
- Pilon, V., S. Payette, P.-L. Couillard et J. Laflamme, 2018. *Surface analysis as a method to reconstruct past and recent dynamics of forest ecosystems*. For. Ecol. Manage. 407: 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.064>
- Pinna, S., A. Malenfant, B. Hébert, et M. Côté, 2009. *Portrait forestier historique de la Gaspésie*. Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles. 204 p. http://www.temrex.ca/uploads/Pinna_Portrait%20forestier%20historique.pdf
- Pinto, F., S. Romaniuk et M. Ferguson, 2008. *Changes to preindustrial forest tree composition in central and northeastern Ontario, Canada*. Can. J. For. Res. 38(7): 1842–1854. <https://doi.org/10.1139/X08-034>
- R Core Team. 2017. *R : A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Système d'analyse statistique. <https://www.r-project.org/>
- Robitaille, A. et J.-P. Saucier, 1998. *Paysages régionaux du Québec méridional*. Les publications du Québec, 213 p.
- Safford, L. O., J.C. Bjorkbom et J.C. Zasada, 1991. « *Betula papyrifera* Marsh. Paper Birch » Dans : Burns, R.M. et B.H. Honkala (éds.). *Silvics of North America*. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Agriculture Handbook n° 654. Washington, D.C. (États-Unis). https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag_654/volume_2/betula/papyrifera.htm
- Saucier, J.-P., P. Grondin, A. Robitaille, J. Gosselin, C. Morneau, P. Richard, J. Brisson, L. Sirois, A. Leduc, H. Morin, E. Thiffault, S. Gauthier, C. Lavoie et S. Payette, 2009. « *Écologie forestière* ». Dans : *Manuel de foresterie*. Éditions MultiMondes Québec. p.167-315.
- Saucier, J.-P., J. Gosselin, C. Morneau et P. Grondin, 2010. *Utilisation de la classification de la végétation dans l'aménagement forestier au Québec*. Rev. For. Fr. (3–4). <https://doi.org/10.4267/2042/38956>
- Siccama, T.G., 1971. *Presettlement and present forest vegetation in northern Vermont with special reference to Chittenden County*. Am. Midl. Nat. 85(1): 153–172. <https://www.jstor.org/stable/2423919>
- Simard, H. et A. Bouchard, 1996. *The precolonial 19th century forest of the Upper St. Lawrence Region of Quebec: A record of its exploitation and transformation through notary deeds of wood sales*. Can. J. For. Res. 26(9): 1670–1676. <https://doi.org/10.1139/x26-188>
- Terrail, R., D. Arseneault, M.-J. Fortin, S. Dupuis et Y. Boucher, 2014. *An early forest inventory indicates high accuracy of forest composition data in pre-settlement land survey records*. J. Veg. Sci. 25(3): 691–702. <https://doi.org/10.1111/jvs.12142>
- Terrail, R., J. Morin-Rivat, G. de Lafontaine, M. Fortin et D. Arseneault, 2019. *Effects of 20th-century settlement fires on landscape structure and forest composition in eastern Québec, Canada*. J. Veg. Sci. 31(1): 40-52. <https://doi.org/10.1111/jvs.12832>

- Thompson, J.R., D.N. Carpenter, C.V. Cogbill et D.R. Foster, 2013. *Four centuries of change in northeastern United States forests*. PLoS One. 8(9): e72540. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072540>
- Walter, R.S. et H.W. Yawney, 1991. « *Acer rubrum* L. Red Maple. » Dans : Burns, R.M. et B.H. Honkala (éds.). *Silvics of North America*. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Agriculture Handbook n° 654. Washington, D.C. (États-Unis). https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag_654/volume_2/acer/rubrum.htm
- 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, NY (États-Unis). 488 p.

Annexes

Annexe 1. Description synthétique des végétations potentielles considérées dans cette étude

Les informations données ici représentent une brève synthèse des descriptions beaucoup plus complètes qui peuvent être trouvées dans le Guide sylvicole du Québec, tome 1 (MRN 2013) ainsi que dans les guides de reconnaissance des types écologiques de chaque région écologique (disponibles gratuitement en ligne à <https://mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/guide-types-ecologiques-carte.jsp>)

FC (chênaie rouge) et FE6 (érablière à chêne rouge)

Ces végétations potentielles se trouvent uniquement dans la partie sud-ouest du Québec. Elles occupent surtout les hauts de versants et les sommets où le sol est mince, pierreux et relativement bien drainé, ou encore, dans le cas de la chênaie rouge, les sites xériques aux dépôts très minces. Le chêne rouge étant une espèce de tolérance intermédiaire, sa fréquence est favorisée par la récurrence des perturbations. Les feux constituent une composante importante de la dynamique de la chênaie rouge. Dans l'érablière à chêne rouge, la dynamique est relativement stable et essentiellement contrôlée par celle des trouées. Le chêne rouge se maintient grâce à sa longévité et aux ouvertures partielles engendrées par la chute des arbres sénescents. Advenant des perturbations plus graves, la végétation peut transiter par un stade dominé par le chêne rouge associé à d'autres feuillus intolérants (peupliers, érable rouge, bouleau à papier).

FE1 (érablière à caryer cordiforme) et FE2 (érablière à tilleul)

Ces végétations potentielles sont les plus méridionales du Québec. L'érablière à caryer cordiforme occupe les terrains plats ou de faibles pentes des plaines du Bas-Outaouais et du Saint-Laurent, alors que l'érablière à tilleuls occupe plutôt les sites mésiques des hauts de pente dans les régions méridionales au relief plus complexe. En fin de succession, ces végétations potentielles sont généralement dominées par l'érable à sucre en association avec le hêtre à grandes feuilles, le tilleul d'Amérique ainsi que d'autres espèces thermophiles pour l'érablière à caryer (p. ex., caryer cordiforme, érable noir, charme de Caroline). Leur dynamique est considérée comme stable et principalement régie par des perturbations légères et peu fréquentes (régime

de trouées). Cependant, en cas de perturbations plus majeures, la dynamique passe généralement par un état transitoire de feuillus intolérants (p. ex., peupliers, érable rouge).

FE3 (érablière à bouleau jaune) et FE4 (érablière à bouleau jaune et à hêtre)

Ces végétations potentielles sont très abondantes dans le domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune, mais également présentes dans les domaines de l'érablière à caryer, de l'érablière à tilleul et de la sapinière à bouleau jaune. Elles sont surtout associées aux sites de hauts et milieux de pente où l'érable à sucre, le bouleau jaune et parfois le hêtre à grandes feuilles dominant le couvert en fin de succession. La dynamique est principalement régie par un régime de trouées et est donc plutôt stable. Advenant des perturbations plus majeures, la dynamique passe par un état transitoire de feuillus intolérants (érable rouge, bouleau à papier, peupliers).

FO1 (ormiaie à frêne noir) et MF1 (frênaie noire à sapin)

Ces sites rassemblent différents sites hydriques ou subhydriques dans l'ensemble du sud du Québec. L'ormiaie à frêne noir, dominée en fin de succession par une forte proportion d'orme d'Amérique avec le frêne noir ou l'érable argenté comme essences compagnes, occupe des dépôts alluviaux aux abords des cours d'eau (surtout sur le bord du fleuve Saint-Laurent et de ses grands affluents). Les frênaies noires à sapin occupent les sites riches serties dans de petites dépressions ouvertes où l'eau circule librement, créant des milieux minéro-trophes (c'est-à-dire où l'eau peut s'écouler). En début de succession, le frêne noir est associé à des feuillus intolérants (érable rouge, peupliers) qui sont progressivement remplacés par des résineux tels que le sapin baumier et le thuya occidental.

MS1 (sapinière à bouleau jaune), MJ1 (bétulaie jaune à sapin et érable à sucre) et MJ2 (bétulaie jaune à sapin)

Ces végétations potentielles sont très abondantes au Québec et occupent généralement les milieux et bas de pente, sur des dépôts de tills au drainage bon à moyen. Ces sites sont dominés en fin de succession par le sapin baumier et le bouleau jaune et principalement accompagné de l'épinette

rouge, de l'épinette blanche et de l'érable à sucre dans certains cas. En raison de la forte proportion de sapin baumier, la dynamique de ces végétations potentielles peut être gravement touchée par les épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette. En cas de perturbations majeures comme les feux, le couvert est dominé de manière transitoire par les feuillus intolérants tels que le bouleau à papier, le peuplier faux-tremble et parfois l'érable rouge.

MS2 (sapinière à bouleau blanc) et MS6 (sapinière à érable rouge)

Ces végétations potentielles, principalement la sapinière à bouleau blanc, sont très abondantes au Québec. Elles occupent le plus souvent les dépôts de texture moyenne et bien drainés associés aux milieux de pente, voire aux hauts de pente dans le cas des sapinières à érable rouge. La dynamique naturelle de ces végétations potentielles peut être liée à des perturbations majeures telles que les épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette et les feux. Selon l'action de ces perturbations, le couvert de ces végétations potentielles peut osciller entre deux extrêmes : l'un est un couvert à dominance résineuse, composé surtout de sapin baumier et d'épinette blanche; l'autre est un couvert à dominance feuillue, composé de bouleau à papier et de peuplier faux-tremble ou d'érable rouge dans le cas des sapinières à érable rouge.

RB1 (pessière blanche ou cédrière issue d'agriculture)

Cette végétation potentielle rassemble les différents groupements végétaux qui peuvent occuper les sites autrefois utilisés pour l'agriculture. Elle n'est pas associée à un milieu particulier ou à un régime de perturbation spécifique, puisqu'elle a été créée pour désigner les sites issus de friches et colonisés par l'épinette blanche ou le thuya occidental.

RC3 (cédrière tourbeuse à sapin)

Cette végétation potentielle se trouve dans l'ensemble du sud du Québec, particulièrement les domaines bioclimatiques des érablières et celui des sapinières à bouleau. Les sites de la cédrière tourbeuse à sapin sont tous couverts d'un dépôt organique; ils occupent les dépressions ouvertes ou les terrains plats mal drainés et minérotophes. Le couvert y est dominé par le thuya occidental, en association avec le sapin baumier et l'épinette noire, parfois également accompagné par le frêne noir ou l'érable rouge. Ces peuplements sont considérés comme stables et peu perturbés, en dehors des épidémies de tordeuse qui peuvent grandement modifier le couvert de sapin baumier et d'épinettes.

RE3 (pessière noire à sphaignes)

La pessière noire à sphaignes est présente dans l'ensemble du sud du Québec et est associée aux milieux hydriques des bas de pente, le plus souvent ombrotrophes. Les peuplements qui occupent ces sites sont principalement composés d'épinette noire, parfois en association avec le mélèze laricin. La récurrence de perturbations telles que les feux affectent surtout la structure interne ainsi que la couche de matière organique accumulée des peuplements, mais très peu la composition de ces derniers.

RP1 (pinède blanche ou pinède rouge)

Cette végétation potentielle se situe surtout dans le sud-ouest du Québec où elle occupe les escarpements rocheux et les sommets où le dépôt de surface est mince, le haut des pentes couvertes d'un dépôt de till moyennement épais ou encore les terrains plats sableux bien drainés. Les pins peuvent y être associés au sapin baumier, aux feuillus intolérants (peupliers, bouleau à papier) ou tolérants (érable à sucre, chêne rouge, hêtre à grandes feuilles). La dynamique de ces végétations potentielle est étroitement liée aux feux qui assurent la régénération des pins, lesquels peuvent ensuite se maintenir grâce à leur grande longévité. En absence de feux, le couvert évolue généralement vers une diminution des pins au profit d'espèces plus tolérantes (érable à sucre, bouleau jaune, sapin baumier).

RS1 (sapinière à thuya)

La sapinière à thuya est présente sur l'ensemble du sud du Québec, mais est plus abondante dans l'est où l'assise rocheuse calcaire des Appalaches lui est particulièrement favorable. Cette végétation potentielle peut être trouvée sur des sites au drainage variable, mais se trouve généralement en bas de pente sur des sites mésiques à hydriques. En fin de succession, ces peuplements sont dominés par le sapin baumier et le thuya occidental et peuvent être accompagnés, selon les sites, des épinettes (épinette noire, épinette blanche ou épinette rouge) ou des bouleaux (bouleau jaune et bouleau à papier). Les perturbations accroissent la proportion des feuillus intolérants (érable rouge, peupliers, bouleau à papier). Il est important de noter ici que, dans nos analyses, les sapinières à thuya sur site humide (type écologique RS18) ont été regroupées avec les cédrières tourbeuses (RC3).

RS2 (sapinière à épinette noire) et RS3 (sapinière à épinette noire et sphaignes)

Ces végétations potentielles ont une répartition plus nordique et ne sont pas très abondantes dans

le sud du Québec. En fin de succession, les peuplements sont dominés par le sapin ainsi que l'épinette noire et peuvent se trouver sur des sites aux conditions de drainage très variées, mais sont plus courants sur des tills au drainage bon ou modéré des milieux et bas de pente. Les perturbations telles que les feux ou les épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette ont pour effet de diminuer la fréquence du sapin au profit de l'épinette noire ou des feuillus intolérants (peuplier faux-tremble, bouleau à papier) surtout quand ces derniers sont déjà présents dans le couvert avant perturbation.

RS5 (sapinière à épinette rouge)

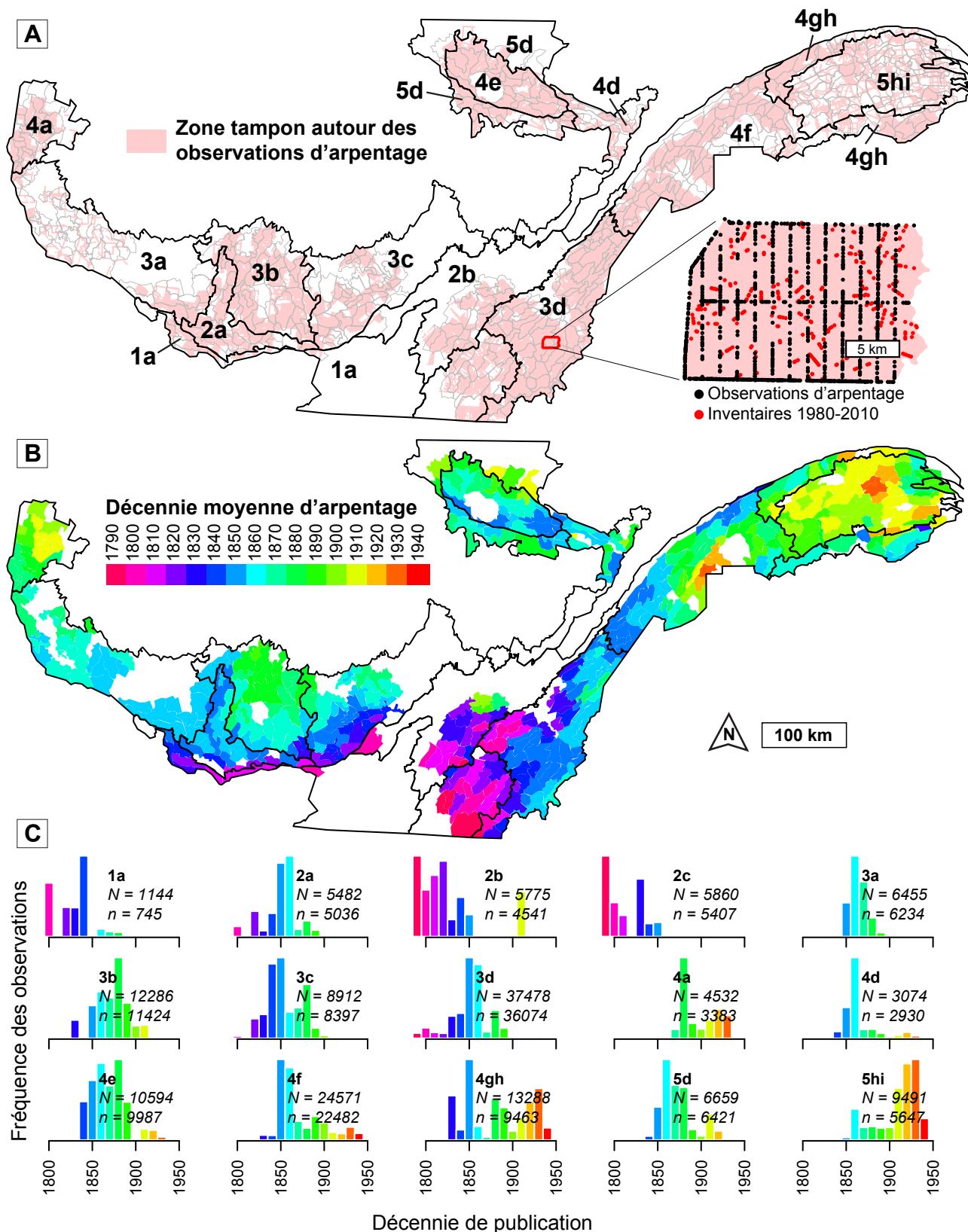
La sapinière à épinette rouge est peu abondante, mais bien présente dans tout le site du Québec et se distingue des autres végétations potentielles de sapinière par une forte proportion de l'épinette rouge comme espèce compagne. Cette végétation potentielle peut occuper des sites variés, mais se trouve plus généralement sur les dépôts minces au drainage mésique des milieux de pente ou des plateaux pierreux. Après l'ouverture totale du

couvert, les feuillus intolérants peuvent devenir dominants de manière transitoire s'ils s'y trouvaient avant la perturbation.

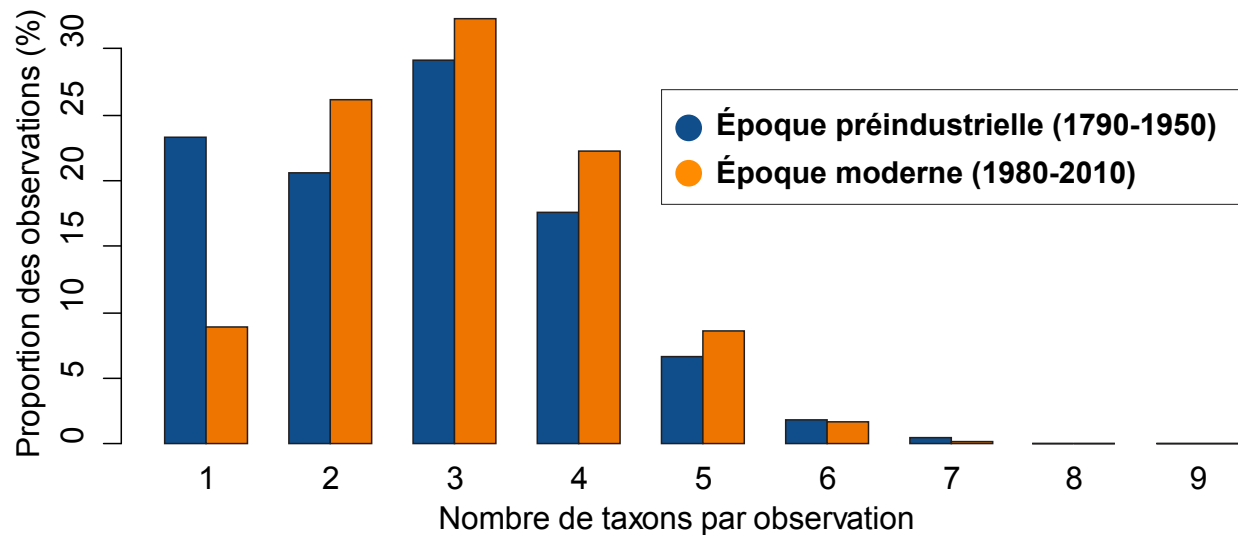
RT1 (prucheraie)

La prucheraie est peu abondante et se trouve surtout dans le sud-ouest de la province, où elle occupe des dépôts très minces formés de tills comme des dépôts de sable mal drainé, mais se trouve plus généralement dans des situations de milieux et hauts de pente. En fin de succession, la pruche peut y être associée à diverses essences résineuses (pin blanc, épinettes), et feuillues (bouleau jaune, érable à sucre, hêtre à grandes feuilles). La prucheraie n'est pas souvent touchée par de grandes perturbations naturelles, de sorte que le renouvellement suit une dynamique de trouées formées par la disparition des arbres sénescents. Cependant, en cas de rares perturbations majeures, les peuplements de feuillus intolérants comme l'érablière rouge, la bétulaie blanche ou la peupleraie peuvent remplacer la prucheraie après une coupe totale.

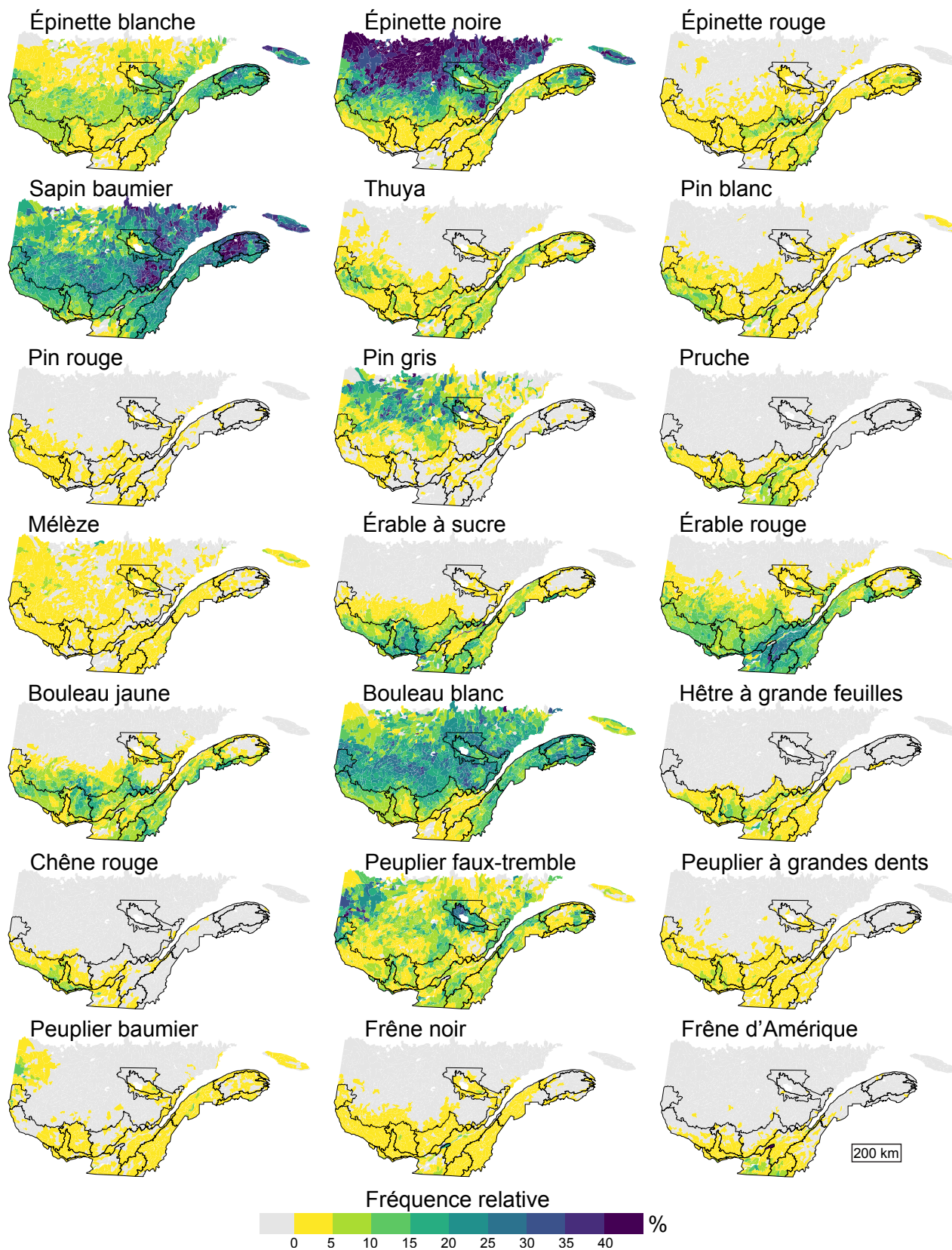
Annexe 2. (a) Répartition des observations historiques dans la région d'étude, (b) décennie moyenne d'arpentage des observations par district écologique, et (c) distribution du nombre d'observations par décennie de publication des rapports d'arpentage par région écologique. N : nombre total d'observations par région écologique, et n : nombre d'observations après retrait des observations linéaires faites sur plus de 300 m (observations retenues pour les végétations potentielles).



Annexe 3. Nombre de taxons par observation pour les données préindustrielles et pour les données modernes après exclusion des taxons représentant moins de 5 % de la surface terrière totale par placette.



Annexe 4. Fréquence relative moderne des principales espèces composant les regroupements de taxons (épinettes, érables, peupliers, pins) par district écologique. La fréquence absolue des taxons a été calculée comme la fréquence de placettes d'inventaires modernes (1980-2010) pour lesquelles un taxon est présent (c.-à-d. sur plus de 5 % de la surface terrière totale par placette) dans chaque district écologique. La fréquence absolue a ensuite été divisée par la somme des fréquences de l'ensemble des taxons du district pour obtenir la fréquence relative.





La composition des paysages forestiers représente un des enjeux clés de l'aménagement durable des forêts. Les paysages en place avant l'exploitation industrielle des forêts au 19^e siècle peuvent servir d'état de référence pour l'aménagement écosystémique et la restauration écologique des forêts. Ici nous utilisons une source originale de données historiques, les archives d'arpentage, pour décrire la composition des forêts préindustrielles et les changements de composition survenus depuis. Les résultats de cette étude procurent aux aménagistes un outil permettant de déterminer, pour un territoire donné, à la fois les espèces cibles pour l'aménagement écosystémique ainsi que les sites les plus propices où concentrer les efforts d'aménagement.