

Dynamique et variabilité naturelle de la pessière à mousses au nord de la région du Lac-Saint-Jean



Dynamique et variabilité naturelle de la pessière à mousses au nord de la région du Lac-Saint-Jean

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
Secteur des forêts
Direction des inventaires forestiers
Décembre 2016

Diffusion

Ministère de la Forêt, de la Faune et des Parcs
Direction des inventaires forestiers
5700, 4^e Avenue Ouest, A-108
Québec (Québec) G1H 6R1
Téléphone : 418 627-8669
Sans frais : 1 877 936-7387
Télécopieur : 418 646-1995
inventaires.forestiers@mffp.gouv.qc.ca
mffp.gouv.qc.ca

© Gouvernement du Québec
Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2016
ISBN : 978-2-550-77195-1 (PDF)

Ce document est accessible à l'adresse suivante :

<http://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/publications-inventaire-forestier.jsp>

Référence

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

Rédaction

Pierre-Luc Couillard, ingénieur forestier, M. Sc., Direction des inventaires forestiers, MFFP

Mathieu Frégeau, biologiste, M. Sc., Chaire de recherche nordique en écologie des perturbations, Département de biologie et Centre d'études nordiques, Université Laval

Serge Payette, professeur titulaire, Ph. D. Chaire de recherche nordique en écologie des perturbations, Département de biologie et Centre d'études nordiques, Université Laval

Pierre Grondin, ingénieur forestier, Ph. D., Direction de la recherche forestière, MFFP

Martin Lavoie, professeur titulaire, Ph. D., Département de géographie et Centre d'études nordiques, Université Laval

Jason Laflamme, ingénieur forestier, M. Sc., Direction des inventaires forestiers, MFFP

Confection des figures et des tableaux

Valérie Roy, technicienne en art appliqué et graphique, Direction des inventaires forestiers, MFFP

Photographie

Pierre-Luc Couillard, ingénieur forestier, M. Sc., Direction des inventaires forestiers, MFFP

Mise en page

Geneviève Barry, agente de secrétariat, Direction des inventaires forestiers, MFFP

Mélanie Major, ingénieure forestière, M. Sc., Direction des inventaires forestiers, MFFP

Révision linguistique

Hélène D'Avignon, ingénieur forestier, rédactrice professionnelle

Remerciements

Nous remercions bien sincèrement les partenaires qui ont participé à la mise sur pied de ce projet : Hubert Morin (Université du Québec à Chicoutimi), Serge Gosselin (Produit forestier Résolu), Damien Côté (Direction générale du Saguenay–Lac-Saint-Jean, MFFP), Héloïse Rheault (Bureau du forestier en chef, MFFP) et Ursula Larouche (Conférence régionale des élus du Saguenay–Lac-Saint-Jean). Yves Landry (Direction des inventaires forestiers, MFFP) et Marianne Ricard (Université Laval) ont été des aides inestimables sur le terrain. Nous remercions aussi Benoît Filion (Université Laval) pour sa participation à l'extraction des charbons de bois dans les sols forestiers et Barbara Godbout (Direction générale de la Capitale-Nationale et de la Chaudière-Appalaches, MFFP) qui a participé à leur identification botanique. La datation des nombreuses rondelles de bois prélevées dans la région a été réalisée par Ann Delwaide, Marianne White et Lady Cardona (Université Laval). Enfin, Véronique Poirier et Jean Noël (Direction de la recherche forestière, MFFP) ont réalisé les analyses numériques permettant d'élaborer une typologie forestière.

Résumé

La mise en place de l'aménagement écosystémique exige le déploiement de stratégies d'aménagement forestier orientées vers la création de paysages aménagés dont les attributs structuraux (structure d'âge, composition botanique et répartition spatiale) se situent à l'intérieur des limites de la variabilité naturelle des paysages. Afin de caractériser cette variabilité, nous avons utilisé une approche écologique visant à caractériser le régime des feux à court et à long terme d'une portion du domaine bioclimatique de la pessière noire à mousses, située au nord de la région du Lac-Saint-Jean. Pour ce faire, la structure, l'âge et l'historique des feux de quatorze peuplements ont été reconstitués. Les résultats montrent que le paysage forestier de cette région boréale est en équilibre avec le régime de feu qui existe depuis au moins les 5000 dernières années. La fréquence des feux élevée se traduit essentiellement par une dynamique de récurrence, qui favorise les espèces pouvant s'établir rapidement dans les aires incendiées. Sous cette dynamique, des forêts formées des mêmes espèces que les peuplements actuels auraient prévalu depuis 5000 ans. L'analyse des charbons de bois a mis en évidence la variabilité dans la fréquence des feux selon les différents types de peuplements. Les stations des forêts de basse altitude occupées par le pin gris et l'épinette noire se caractérisent par un intervalle de retour moyen de feu inférieur à 200 ans. À l'inverse, dans les stations de collines, où l'on trouve les espèces moins adaptées au passage des feux, comme le sapin baumier, l'intervalle de retour moyen de feu est de l'ordre de 300 ans.

Table des matières

1. Mise en contexte.....	1
2. Présentation de la région d'étude	1
2.1. Contexte physiographique	1
2.2. Typologie forestière	3
3. Méthodes.....	4
3.1. Dynamique forestière à court terme	4
3.1.1. Échelle de la station	4
3.1.2. Échelle régionale	6
3.2. Dynamique forestière à long terme.....	6
3.2.1. Échelle de la station	6
3.2.2. Échelle de la région	7
4. Résultats.....	8
4.1. Caractéristiques des stations	8
4.2. Dynamique forestière à court terme	9
4.2.1. Échelle de la station	9
4.2.2. Échelle régionale	11
4.3. Dynamique forestière à long terme.....	16
4.3.1. Échelle stationnelle	16
4.3.2. Échelle de la région	19
5. Discussion.....	24
6. Conclusion.....	27
7. Bibliographie	29
Annexe 1. Typologie forestière	31
Annexe 2. Courbes d'accumulation	32
Annexe 3. Étendue des feux dans l'ensemble de la région au cours de l'Holocène.....	35

Liste des figures

Figure 1 : Localisation de la région d'étude par rapport au domaine bioclimatique de la pessière noire à mousses (zone bleue). Les points (MFFP) et les triangles (Frégeau 2013) correspondent aux stations échantillonnées servant à reconstituer l'histoire des feux et les carrés aux deux tourbières qui ont permis de reconstituer l'histoire postglaciaire de la végétation. Les étoiles correspondent aux stations de forêts anciennes étudiées.	2
Figure 2 : Toposéquence de la région d'étude	3
Figure 3 : Surface terrière (m ² /ha) occupée par les tiges vivantes (a) et mortes (b), et nombre de plantules (c) dénombrées dans chaque station.....	10
Figure 4 : Caractérisation des stations selon une analyse en composantes principales (cadrage de type 1). Les espèces arborescentes sont représentées en noir, les espèces arbustives soulignées en bleu et les espèces de sous-bois en rouge. Les stations d'échantillonnage sont indiquées en noir, encadrées.....	10
Figure 5 : Structure de taille (DHP) des tiges vivantes (bouleau à papier, pin gris, sapin baumier et épinette noire) des stations PG (a), ENPG2 (b), ENp1 (c), SBBP3 (d) et BP2 (e) et des tiges mortes de la station SBBP2 (f).....	12
Figure 6 : Cartographie des feux survenus dans la région d'étude entre 1865 et 1970. Les feux ont été datés à l'aide de cicatrices (points rouges) ou estimés (*) à partir des dates d'établissement des arbres dominants (triangles rouges).....	13
Figure 7 : Cartographie des feux survenus dans la région d'étude depuis 1971. La date du feu de 1971 a été corroborée à l'aide de cicatrices (point rouge).....	14
Figure 8 : Proportion (%) de la région incendiée par décennie	14
Figure 9 : Distribution de la taille des vieilles forêts (> 150 ans)	15
Figure 10 : Cartographie des vieilles forêts (trame de gris). Les points présentent les stations d'échantillonnage qui ont un faible écart d'âge entre les tiges, ce qui indique qu'elles se seraient établies à la suite de feux survenus au cours des décennies 1780 (vert foncé), 1800 (vert pâle), 1820 (jaune), 1830 (orange) et 1850 (rouge). Les étoiles représentent les stations d'échantillonnage dont l'écart d'âge des tiges s'étend sur plusieurs années. Il s'agit donc de la date minimale du dernier feu.	15
Figure 11 : Composition botanique des charbons de bois de chaque station (exprimé en %) dans les compartiments de surface (a) et de sol minéral (b)	17
Figure 12 : Intervalle de feu moyen estimé de chaque station au cours des 1000 dernières années ...	18
Figure 13 : Nombre de charbons des différents taxons en fonction du temps (classes de 200 ans) cumulé pour chaque type de peuplements. Les charbons qui n'ont pu être identifiés ne sont pas présentés.	20
Figure 14 : Nombre de charbons de bois datés dans toutes les stations en fonction du temps (classe de 200 ans) selon leur emplacement dans le compartiment de surface (matière organique) et dans celui du sol minéral.....	21

Figure 15 : Diagramme pollinique en pourcentage des taxons vasculaires terricoles les plus importants de la tourbière TB2..... . 22

Figure 16 : Diagramme pollinique en pourcentage des taxons vasculaires terricoles les plus importants de la tourbière TB3..... . 22

Figure A.1 : Diagramme de triple projection de l'analyse de redondance caractérisant les ~28 000 peuplements selon la matrice de végétation Y et la matrice des variables explicatives X. L'analyse de groupement k-Means a permis de diviser les peuplements en huit groupes (points de couleur). Les espèces forestières (encadrés noirs) représentées sont l'épinette noire (EPN), le pin gris (PIG), le sapin baumier (SAB) et le bouleau à papier (BOP). Les variables explicatives (points noirs) sont l'altitude, la pente, le type de dépôt (glaciaire épais, DE_GLA; glaciaire mince, DE_MIN; fluvioglaciaire, DE_FLU; organique, DE_ORG), la classe de drainage (mésique, DR_MES; subhydrique, DR_SUB; hydrique, DR_HYD), le nombre de degrés-jours (DJ) et la température moyenne annuelle (TMA). 31

Figure A.2 : Nombre de feux cumulés en fonction du temps (A) et nombre de charbons datés dans chacune des stations depuis les 1000 dernières années (B) ou depuis le premier feu détecté (C). Les courbes en B et C sont la moyenne de 100 réitérations où $F(n) = F_{max}(1 - e^{-kn})$ où $F(n)$ correspond au nombre de feux détectés, n au nombre de charbons datés, F_{max} le nombre de réels estimés (asymptote), et k à la constante. 33

Figure A.3 : Histoire régionale des feux basée sur la classification hiérarchique des dates de feux de toutes les stations. (a) Nombre cumulatif d'évènements de feu en fonction du temps et nombre d'évènements de feu depuis 5000 ans. (b) Temps écoulé depuis le dernier feu (TEDF) en fonction du temps et de l'intervalle moyen des feux à l'échelle de la région (IMFR) au cours des 5000 dernières années. (c) Nombre de stations qui ont enregistré chacun des feux. La période de référence du calcul de l'IMFR est celle couvrant les 5000 dernières années A.A. (ligne pointillée)..... . 35

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques générales des 14 stations échantillonnées	9
Tableau 2 : Datation du ou des deux dernier(s) feu(x) survenu(s) dans chaque station déterminée à l'aide de cicatrice de feu (1) ou de la date d'établissement des dix arbres échantillonnés (2). Chez certaines stations, la date du dernier feu a été estimée à l'aide de l'âge du plus vieil arbre (³).....	13
Tableau 3 : Temps écoulé depuis le dernier feu (TEDF) calculé à l'aide de l'âge des plus vieux arbres (*), de la datation au radiocarbone des charbons de bois de l'horizon organique de surface (†) et d'une cicatrice de feu (‡)	16
Tableau 4 : Date du plus vieux feu (DPVF), nombre de feux échantillonnés, nombre de feux estimés à l'aide des courbes d'accumulation et intervalle de feu moyen estimé (Im) de chacune des stations au cours de l'Holocène et des 1000 dernières années	18

1. Mise en contexte

Ce rapport présente une synthèse des connaissances et une analyse de la dynamique forestière et de la variabilité écologique naturelle des paysages forestiers de la partie septentrionale de la région du Lac-Saint-Jean. Il s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre de l'aménagement écosystémique au Québec qui vise à assurer le maintien de la biodiversité et de la viabilité des écosystèmes forestiers. Afin que l'on atteigne cet objectif, on doit orienter les stratégies d'aménagement forestier vers la création de paysages aménagés, dont les attributs structuraux (structure d'âge, composition botanique et répartition spatiale) se situent à l'intérieur des limites de la variabilité naturelle des paysages. Avant l'époque de la récolte forestière à l'échelle régionale, les paysages forestiers naturels et leurs composantes successionnelles évoluaient sous l'influence directe du climat et des perturbations naturelles. La connaissance de ces changements survenus au cours d'un passé récent (dynamique contemporaine) et lointain (dynamique holocène) permet de définir l'amplitude de la variabilité écologique naturelle des paysages forestiers. C'est en connaissant cette variabilité que l'on peut assurer de manière réaliste le maintien de la diversité biologique des écosystèmes. Bien que la variabilité écologique à long terme constitue un aspect important de la détermination des états de référence, des enjeux et des cibles d'aménagement écosystémique, elle est encore peu connue dans la majorité des régions forestières sous aménagement au Québec.

L'objectif principal de cette étude est de caractériser la variabilité écologique naturelle à long terme des paysages forestiers de la partie septentrionale de la région du Lac-Saint-Jean dominée par l'épinette noire (*Picea mariana*

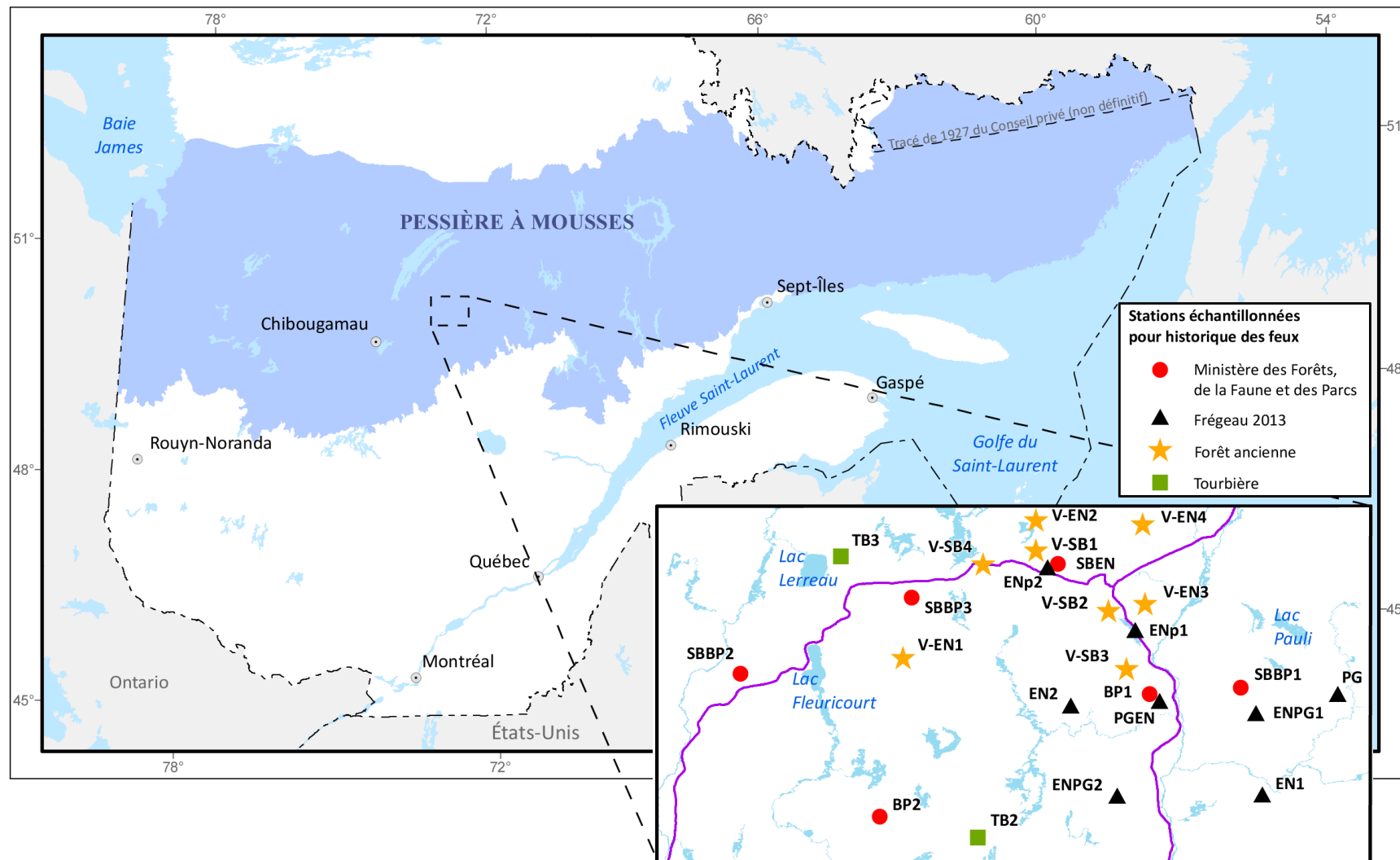
(Mill.) B.S.P.), le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.), le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) et le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.). L'atteinte de cet objectif exige une meilleure connaissance du régime des feux à l'échelle contemporaine et holocène et de son influence sur la dynamique de ces écosystèmes forestiers.

2. Présentation de la région d'étude

2.1. Contexte physiographique

Les stations forestières étudiées se situent dans la région administrative du Lac-Saint-Jean, à environ 120 km au nord de Girardville, entre les latitudes 50° 07' N et 50° 30' N et entre les longitudes 72° 30' O et 73° 15' O (figure 1). Elles se trouvent dans la région délimitée par neuf feuillets écoforestiers à l'échelle 1 : 20 000 (32I02NE, 32I02NO, 32I03NE, 32I06NE, 32I06NO, 32I07NE, 32I07NO, 32I07SE et 32I07SO), qui couvre une superficie de 2230 km². La région est traversée respectivement à l'est et à l'ouest par les rivières Mistassinni et Nestaocano. Sur le plan géologique, la région d'étude fait partie du Bouclier canadien, plus particulièrement de la province de Grenville. Le relief est composé de basses collines culminant à environ 600 m d'altitude au-dessus du niveau marin. Il est recouvert de dépôts glaciaires épais sur les collines et de sédiments fluvioglaciaires en bordure des principaux cours d'eau. La texture du sol de toutes les stations est généralement grossière et la pierrosité est élevée. La région a été libérée des glaces vers 8000 ans avant aujourd'hui (Occhietti et al. 2011). La région d'étude fait partie de la région écologique des coteaux de la rivière Nestaocano (6e) du sous-domaine bioclimatique de la pessière noire à mousses de l'ouest. Le climat se caractérise par une température annuelle moyenne de -1,5 °C et des précipitations moyennes annuelles de 970 mm (Environnement Canada 2012).

Figure 1 : Localisation de la région d'étude par rapport au domaine bioclimatique de la pessière noire à mousses (zone bleue). Les points (MFFP) et les triangles (Frégeau 2013) correspondent aux stations échantillonnées servant à reconstituer l'histoire des feux et les carrés aux deux tourbières qui ont permis de reconstituer l'histoire postglaciaire de la végétation. Les étoiles correspondent aux stations de forêts anciennes étudiées.



2.2. Typologie forestière

Une typologie forestière a permis de caractériser les paysages forestiers de la région. Pour ce faire, nous avons eu recours à des analyses numériques dans le but de connaître les relations entre la végétation, les variables du milieu physique et le climat. Ces analyses ont été réalisées à l'aide de deux matrices basées sur les données tirées des cartes écoforestières du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) du Québec. La matrice Y décrit la végétation des peuplements forestiers considérés dans cette étude. La matrice X comprend les variables explicatives de la végétation qui portent sur le milieu physique et le climat. Les données relatives au milieu physique sont tirées des cartes écoforestières, alors que celles portant sur le climat proviennent du logiciel BioSIM (Régnière et Saint-Amant 2008). Les deux matrices ont été soumises à une analyse de redondance (Legendre et Legendre 2012), puis à une analyse de groupement (k-Means).

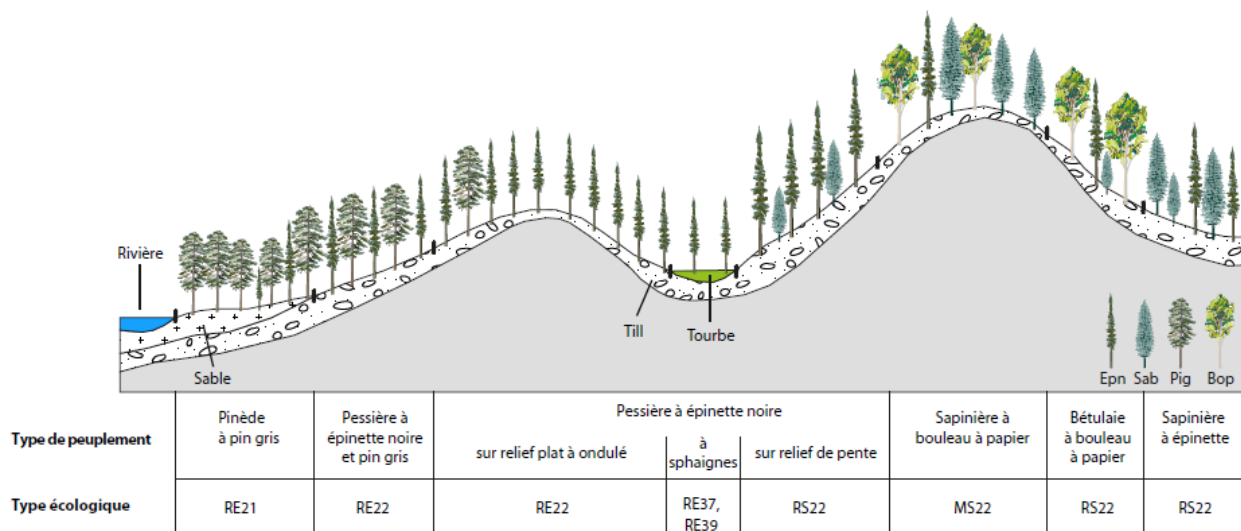
Ces analyses ont permis de former trois grands groupes de végétation. Le premier groupe est associé au pin gris, le deuxième groupe à l'épinette noire et le troisième groupe au sapin baumier et au bouleau à papier (annexe 1). Ces groupes ont été divisés en huit types de peuplements en fonction de leur composition forestière et du milieu physique qu'ils occupent.

Ces analyses ont aussi permis de classer les variables explicatives de la végétation selon leur importance relative et de cartographier les paysages sur la base de ces variables.

Types de peuplements associés au pin gris

Les pinèdes à pin gris (ci-après pinèdes) et les pessières à épinette noire et pin gris (appellation qui exprime le mélange entre les deux espèces sans égard à leur abondance respective; ci-après pessières à pin gris) sont les deux types de peuplements qui forment ce premier groupe (figure 2). Ces types abondent à basse altitude (moins de 450 m), puis leur importance diminue graduellement pour disparaître au-dessus de 500 m d'altitude. Les pinèdes occupent les dépôts de sable bien drainé. En sous-bois, elles sont surtout dominées par les lichens, mais elles renferment parfois une strate arbustive d'éricacées plus ou moins bien étendue. Ces pinèdes couvrent seulement 2 % de la superficie forestière de la région où se trouvent les sédiments fluvioglaciaires le long des principaux cours d'eau. Les pessières à pin gris occupent les dépôts morainiques à texture grossière, au-delà des complexes fluvioglaciaires. Leur sous-bois est dominé par les éricacées. Ces peuplements couvrent 22 % de la superficie forestière de la région. Selon la classification écologique du MFFP, les types de peuplements associés au pin

Figure 2 : Toposéquence de la région d'étude



gris appartiennent à la végétation potentielle de la pessière noire à mousses (RE2).

Types de peuplements associés à l'épinette noire

Les pessières à épinette noire (ci-après pessières) couvrent près de 53 % de la région d'étude (figure 2). On distingue trois types de peuplements selon le milieu qu'ils occupent. Les dépôts organiques mal drainés sont colonisés par les pessières à sphaignes (couverture de 11 % de la région). Les pessières à éricacées et les pessières à mousses hypnacées abondent sur les dépôts glaciaires. La plupart du temps, on les observe sur les reliefs plats à légèrement ondulés (couverture de 32 % de la région), mais on les trouve aussi sur les versants plus prononcés des collines (couverture de 10 % de la région), milieux qu'elles partagent avec les sapinières à bouleau à papier et les bétulaies à bouleau à papier (ci-après bétulaies). Ces derniers peuplements se distinguent des pessières occupant les reliefs plats à légèrement ondulés par la présence sporadique du sapin baumier et du bouleau à papier. Selon la classification écologique du MFFP, les pessières occupant les dépôts organiques appartiennent à la végétation potentielle de la pessière noire à sphaignes (RE3), les pessières occupant les reliefs plats à légèrement ondulés à la végétation potentielle de la pessière noire à mousses (RE2) et les pessières établies sur les versants des collines à la végétation potentielle de la sapinière à épinette noire (RS2).

Types de peuplements associés au sapin baumier et au bouleau à papier

La sapinière à bouleau à papier, la bétulaie et la sapinière à épinette noire (appellation qui exprime le mélange entre les deux espèces sans égard à leur abondance respective) sont les types de peuplements qui appartiennent à ce groupe (figure 2). La sapinière à épinette noire couvre 11 % de la région d'étude. Elle occupe généralement le bas versant des collines. Le sous-bois des sapinières à épinette noire est dominé par les mousses hypnacées et les éricacées, notamment les *Vaccinium* et le *Gaultheria hispidula*. Les sapinières à bouleau à papier

occupent les versants des collines. Elles couvrent 9 % de la région d'étude. Le bouleau à papier et l'épinette noire sont presque toujours présents dans ces peuplements, alors que l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) est peu répandue. Les mousses hypnacées et les espèces herbacées dominent le sous-bois. Les bétulaies, qui couvrent une petite surface, occupent le haut versant et le sommet des collines. Elles couvrent seulement 2 % de la région d'étude. Le sous-bois des bétulaies est dominé par les arbustes, dont l'aulne crispé (*Alnus viridis* (Chaix.) D.C.). Selon la classification écologique du MFFP, les sapinières à épinette noire et les bétulaies appartiennent à la végétation potentielle de la sapinière à épinette noire (RS2), tandis que les sapinières à bouleau à papier font partie de la végétation potentielle de la sapinière à bouleau à papier (MS2).

3. Méthodes

3.1. Dynamique forestière à court terme

3.1.1. Échelle de la station

Afin de définir la dynamique forestière contemporaine, nous avons utilisé une approche écologique basée sur la composition, la structure et l'âge des peuplements. La réalisation d'un inventaire exploratoire a permis d'identifier un certain nombre de peuplements ($n = 14$) propices à l'échantillonnage (figure 1). Les stations correspondant aux types de peuplements associés au pin gris et à l'épinette noire ($n = 8$) ont été échantillonnées à des fins de validation de la chronoséquence théorique correspondant à l'installation du pin gris après un feu suivi par l'établissement graduel de l'épinette noire, le stade final de la succession étant une forêt d'épinette noire à l'équilibre. Pour ce faire, une pinède, trois pessières à pin gris et quatre pessières, dont deux établies sur un relief plat à légèrement ondulé et deux sur versants de collines, ont été échantillonnées au cours de l'été 2010 dans le cadre du projet de maîtrise de Mathieu Frégeau à l'Université Laval, sous la direction de Serge Payette (Frégeau 2013, Frégeau et al. 2015). Les résultats de ces travaux sont repris dans le présent rapport. Les stations

correspondant aux types de peuplements associés au sapin baumier et au bouleau à papier ($n = 6$) étaient alignées le long d'un gradient décroissant d'abondance du bouleau à papier pour que l'on puisse tester l'hypothèse suivant laquelle une chronoséquence commence par l'installation du bouleau à papier après feu puis se fait remplacer par une forêt dominée par le sapin baumier. Deux bétulaies, trois sapinières à bouleau à papier et une sapinière à épinette noire ont été échantillonnées par le MFFP au cours des étés 2010 et 2011.

Composition et structure des peuplements

L'emplacement d'une place-échantillon de 500 m² (50 m × 10 m) a été choisi aléatoirement dans chacune des 14 stations. À l'intérieur de chaque place-échantillon, on a mesuré le diamètre à hauteur de poitrine (1,3 m du sol) de tous les arbres afin d'établir la structure de taille de la forêt. Les plantules et les gaules des espèces arborescentes, de hauteur inférieure à 1,30 m, ont été dénombrées au sein de 20 placettes de régénération circulaires, de 1,13 m de rayon (4 m²), disposées tous les 5 m le long des segments inférieur et supérieur (50 m) de la place-échantillon.

Un inventaire floristique a aussi été effectué. La méthode du point d'interception (Mueller-Dombois et Ellenberg 1974) a été utilisée pour échantillonner les espèces vasculaires et invasculaires présentes le long du segment inférieur des places-échantillons. Pour ce faire, la présence des espèces touchant la tige métallique (ou son prolongement vertical) enfoncée à chaque intervalle de 50 cm a été systématiquement notée. Afin d'établir des relations entre les stations ($n = 14$) et les espèces ($n = 42$), on a procédé à une analyse en composantes principales. La matrice des abondances d'espèces soumise à l'analyse a préalablement subi une transformation de Hellinger, permettant ainsi de donner moins d'importance aux espèces les plus fréquentes (Legendre et Gallagher 2001).

Âge des peuplements

Afin de déterminer l'âge des peuplements actuels, on a échantillonné dix arbres dominants dans chacune des stations. On assume que l'âge maximal obtenu des arbres échantillonnés correspond, à quelques années près, à l'âge du feu, lorsque l'on observe un écart d'âge de quelques années seulement entre les arbres échantillonnés. Dans certains cas, des arbres portant des cicatrices de feux ont aussi été échantillonnés à proximité de la place-échantillon, puisqu'elles permettent de déterminer précisément l'année à laquelle est survenu le feu. Une rondelle de bois a été prélevée à la base du tronc de chaque arbre, le plus près possible du collet. Le séchage et le sablage de chacune d'elle a permis de mettre en évidence leurs cernes de croissance. Ces derniers ont été dénombrés sous une loupe binoculaire.

Description des variables du milieu physique

Les principales variables descriptives du milieu physique (texture du sol minéral, épaisseur de la matière organique, pH) ont été mesurées. En laboratoire, la composition granulaire (sable, limon et argile) de chaque échantillon a été déterminée selon la méthode Bouyoucos (McKeague 1978). On a évalué la texture du sol minéral de trois échantillons de l'horizon B recueillis au centre et aux deux extrémités du segment inférieur de la place-échantillon. La classe texturale a ensuite été déterminée grâce à l'abaque de classification des sols (Groupe de travail sur la classification des sols 2002). L'épaisseur moyenne (1 écart-type) des horizons organiques (L, F, H) a été mesurée dans 25 microstations réparties tous les 5 m sur le pourtour ainsi qu'au centre de la place-échantillon. Enfin, le pH et l'extraction de l'azote et du carbone organique (C/N) de trois échantillons de matière organique (horizon F) recueillis au centre et aux deux extrémités du segment inférieur de la place-échantillon ont été déterminés.

3.1.2. Échelle régionale

Âge des forêts

Afin de déterminer l'âge des forêts à l'échelle du paysage, nous avons procédé à la cartographie puis à la datation des feux survenus dans la région au cours des 150 dernières années. La cartographie des feux récents (1970 à aujourd'hui) a été réalisée à l'aide des cartes écoforestières produites par le MFFP qui comprennent l'année d'apparition des feux survenus au cours de cette période. La cartographie des feux plus anciens (avant 1970) a été effectuée à partir des limites de feux visibles sur les cartes forestières les plus anciennes du MFFP, soit celles du 1^{er} inventaire décennal produites en 1968 dans la région. Ces cartes permettent de cartographier les feux survenus depuis la fin du 19^e siècle. Comme on ne connaît pas les années d'apparition de ces feux, ils ont été datés sur le terrain au moyen de cicatrices ou de l'année d'établissement de 3 à 5 arbres dominants d'espèces reconnues pour s'établir rapidement à la suite d'un feu, soit le pin gris, l'épinette noire et le bouleau à papier.

Nous avons poursuivi également l'échantillonnage à l'extérieur des zones incendiées depuis la fin du 19^e siècle afin de déterminer l'âge des plus vieilles forêts de la région d'étude. Cinq arbres dominants ont été échantillonnés dans 30 stations additionnelles pour que l'on puisse dater les feux survenus avant 1860. L'année d'établissement des arbres portant des cicatrices de feu a aussi été utilisée pour la datation des feux survenus au cours de cette période. Rappelons qu'un écart d'âge de quelques années seulement entre les tiges permet d'assumer que l'âge maximal des arbres échantillonnés correspond approximativement à l'âge du dernier feu. Pour déterminer le temps écoulé depuis le dernier feu (TEDF), nous avons procédé à l'échantillonnage et à la datation de charbons de bois enfouis dans l'horizon organique de surface. Il s'agit de la seule méthode permettant de dater les feux anciens dans les sites où les cohortes établies après le dernier feu sont disparues et remplacées par des arbres de

deuxième génération ou plus (Payette 2010). Parmi les trente stations étudiées, huit d'entre elles (4 pessières et 4 sapinières) ont été retenues aux fins d'échantillonnage (figure 1); celles-ci présentaient une structure irrégulière formée d'arbres de taille et de hauteur variées et ne semblaient pas perturbées par des feux récents. Dans chacune d'elles, les charbons de surface de trois microstations (30 cm²) espacées de 10 m ont été échantillonnés. De 3 à 6 charbons ont été sélectionnés dans chacune des stations pour la datation au radiocarbone. Le protocole de datation au radiocarbone est expliqué à la section suivante.

3.2. Dynamique forestière à long terme

3.2.1. Échelle de la station

Échantillonnage des charbons de bois

La reconstitution de l'histoire des feux à l'aide des charbons dans les sols forestiers a été effectuée dans les 14 stations d'échantillonnage au moyen de la méthode utilisée par de Lafontaine et Payette (2011), Payette et al. (2012) et Couillard et al. (2013). Les charbons de bois ont été échantillonnés dans les 25 microstations de la place-échantillon. La matière organique et la surface du sol minéral de chacune des microstations ont été soigneusement examinées pour que l'on puisse y extraire les charbons de bois présents. Par la suite, les échantillons de sol minéral ont été récoltés dans les 25 microstations à l'aide d'un carottier permettant l'extraction de 750 cm³ de sol. En laboratoire, les échantillons de sol minéral ont été immergés pendant 12 heures dans une solution d'hydroxyde de potassium (KOH 3 %) pour que les agrégats se dispersent et que la matière organique s'élimine lors du tamisage. Chaque échantillon a été tamisé par jet d'eau dans un tamis de mailles de 2 mm. Les charbons de bois ont ensuite été extraits par triage manuel sous la loupe binoculaire, puis séchés à l'air libre avant d'être pesés. On a sélectionné les charbons de masse supérieure à 5 mg, puis ils ont été sectionnés selon les trois plans anatomiques du bois afin de procéder à leur identification botanique. Les caractéristiques anatomiques du bois ont été observées à l'aide

d'un microscope à lumière incidente (grossissements de 200, 500 et 1000 ×). L'identification botanique a été réalisée à l'aide de la collection de référence des bois brûlés du Centre d'études nordiques de l'Université Laval.

La taille des charbons récoltés (> 2 mm) laisse croire qu'ils auraient été formés et déposés in situ et ne seraient pas d'origine extralocale (Ohlson et Tryterud 2000). Les charbons ont été extraits du sol minéral sans égard à leur position stratigraphique dans l'échantillon. Contrairement aux microcharbons déposés en couche dans les sédiments lacustres ou dans les tourbes, les charbons trouvés dans le sol minéral ne sont généralement pas stratifiés. Ils sont incorporés dans le sol minéral au cours du temps par des processus de bioturbation, causés notamment par le déracinement des arbres (Talon et al. 2005).

Dans chacune des stations d'échantillonnage appartenant aux types de peuplements associés au pin gris et à l'épinette noire, 45 charbons de bois, dont 25 proviennent de la matière organique de surface et 20 autres du sol minéral, ont été datés au ^{14}C . En ce qui concerne les stations appartenant aux types de peuplements associés au sapin baumier et au bouleau à papier, 27 à 30 charbons de bois, soit 15 charbons provenant de la matière organique de surface et 12 à 15 charbons extraits du sol minéral, ont été datés. Les charbons datés ont été sélectionnés en fonction de la composition botanique des pièces (genre ou espèce) et de leur répartition spatiale parmi les 25 microstations. Des charbons non identifiés, en raison de leur structure altérée, ont aussi été datés.

Les pièces de charbon ont été prétraitées (fractionnement des composantes carbonées, oxydation en CO_2 , graphitisation sur une cible) au Laboratoire de radiochronologie du Centre d'études nordiques (Université Laval). Les échantillons ont été datés au ^{14}C par spectrométrie de masse par accélérateur (SMA) au Laboratoire KCCAMS (Keck Carbon Cycle AMS facility) de l'Université de Californie, à Irvine. Le logiciel Calib7.02 (Stuiver et al. 2013) ainsi que la

base de données IntCal13 (Reimer et al. 2013) ont été utilisés pour l'étalonnage des dates ^{14}C en années calendaires. Pour chacune des dates ^{14}C (± 2 écarts-types), on a considéré la distribution des âges calendaires en fonction des états probabilistes fournis par le logiciel. La distribution des âges calendaires est généralement fractionnée sous forme d'états probabilistes à cause des variations du contenu en ^{14}C atmosphérique associées à l'activité solaire (Solanki et al. 2004). L'intervalle d'années calendaires ayant la plus grande probabilité a été utilisé pour la détermination de l'âge des échantillons. L'année moyenne de cet intervalle a été retenue comme étant l'année étalonnée BP de l'échantillon daté, et 65 années ont été ajoutées à l'âge calendaire par rapport à l'année de référence BP qui est 1950.

Histoire des feux

Nous avons reconstitué l'histoire des feux en comptabilisant les dates au radiocarbone de chaque station. Les charbons datés dont les intervalles de confiance étalonnés se chevauchaient ont été considérés comme étant issus d'un même feu. Des intervalles de feu ont été calculés pour chaque station. Un intervalle de feu correspond au nombre d'années qui sépare deux événements de feu, alors que l'intervalle de feu moyen est la moyenne de tous les intervalles qui séparent les feux de la période considérée. L'échantillonnage aléatoire de charbons n'assure pas la détection de tous les feux survenus dans une station donnée. On a utilisé des courbes d'accumulation afin de savoir si le nombre de feux détectés correspondait au nombre de feux réels survenus dans chaque station (de Lafontaine et Payette 2012). Le protocole des courbes d'accumulation est présenté à l'annexe 2.

3.2.2. Échelle de la région

Histoire régionale des feux

Pour estimer l'activité des feux dans la région au cours des derniers millénaires, on a effectué une analyse de l'abondance des charbons dans le temps, toutes stations confondues. Nous avons utilisé des charbons plus jeunes que 5000 ans AA en presumant que leur abondance décroissait

exponentiellement avec le temps. Cette tendance est attribuable à la dégradation des charbons et du passage successif des feux brûlant à nouveau les charbons (Payette et al. 2012). Pour éliminer cette tendance, nous avons effectué une régression log-linéaire à l'aide de la fonction $\text{lm}()$ du logiciel R (R Development Core Team 2011) basée sur la fréquence des dates de charbons de surface. Aux fins de cette analyse, les dates ^{14}C des charbons ont été regroupées par classe de 150 ans, étant donné que cette taille de classe maximise le nombre de classes tout en formant la distribution la plus uniforme possible.

Pour l'estimation de l'étendue des feux dans l'ensemble de la région au cours de l'Holocène, les dates des feux de toutes les stations ont été regroupées en période de 45 ans. Cette période a été retenue, car il s'agit du plus court intervalle de temps entre deux feux détectés dans une même station. Elle permet aussi de tenir en considération les incertitudes liées à la datation des feux. Le détail de cette méthode est présenté à l'annexe 3.

Histoire postglaciaire de la végétation

On a procédé à l'analyse pollinique de carottes sédimentaires prélevées dans deux tourbières ombrotrophes (TB2 et TB3) de la région, afin de reconstituer l'histoire postglaciaire de la végétation régionale (figure 1). Les carottes ont été récoltées aux endroits les plus profonds (déterminés par sondages à la tige) de chaque tourbière à l'aide d'un carottier russe.

En laboratoire, les carottes ont été coupées en tranches contiguës de 1 cm d'épaisseur. Les analyses polliniques ont été réalisées selon un pas analytique de 8 cm. Pour chacun des niveaux d'échantillonnage, on a traité chimiquement un sous-échantillon de 1 cm³ (KOH 10 %, HCl, FH, acétolyse), afin d'éliminer la matière organique et la matière minérale et ainsi concentrer les grains de pollen et les spores. Des grains de pollen de *Eucalyptus globulus*, dont la concentration fut préalablement déterminée, ont été ajoutés au début du traitement chimique. Le but était de calculer la concentration pollinique des échantillons (nombre de grains de pollen

par centimètre cube de sédiment). Les grains de pollen et les spores ont été dénombrés et identifiés au microscope optique (400 ×) à l'aide d'atlas de référence et de la collection de référence du Centre d'études nordiques (Université Laval). Au moins 300 grains de pollen de plantes vasculaires terricoles (à l'exception des *Cyperaceae* et des *Ericaceae*) ont été dénombrés pour chacun des échantillons (somme pollinique). Pour chacune des stations d'échantillonnage, les données polliniques de chaque diagramme pollinique sont exprimées en pourcentage. Seules les courbes polliniques des taxons vasculaires terricoles les plus fréquents ont été retenus dans les diagrammes polliniques. Ces derniers ont été subdivisés en zones d'assemblage pollinique.

Le contact organo-minéral de même que différents niveaux des deux carottes ont été datés au radiocarbone (matière organique en vrac) à des fins d'établissement d'un cadre chronologique des reconstitutions de l'histoire de la végétation. Huit échantillons ont été datés provenant de la tourbière TB2 et neuf provenant de la tourbière TB3. Les âges obtenus du laboratoire exprimés en années conventionnelles (^{14}C) ont été étalonnés (années AA) et arrondis à la décennie près.

4. Résultats

4.1. Caractéristiques des stations

Les dépôts de surface de toutes les stations sont constitués de till épais, à l'exception de la pinède qui occupe une terrasse fluvioglacière. Le drainage est bon (classe 2) ou modéré (classe 3) et la texture du sol minéral varie entre sable, sable loameux et loam sableux (tableau 1). Les sols sont des podzols ayant un pH variant entre 3,60 et 4,19. L'épaisseur de la matière organique varie entre 5 et 23 cm. L'horizon organique est plus épais (> 20 cm) dans les pessières, en raison de la présence d'éricacées qui forment un épais tapis de rhizomes sous la surface du sol. Le rapport C/N est plus élevé dans les sols des stations associées au pin gris et à l'épinette noire comparativement à celui des sols des stations associées au sapin baumier et au bouleau à papier où il varie entre 25 et 33. Ces rapports sont élevés

Tableau 1 : Caractéristiques générales des 14 stations échantillonnées

Groupe	Types de peuplements	Station	Altitude (m)	Pente (%)	Texture	Épaisseur de la mo. (cm)	pH	C/N
Pin gris	Pinède	PG	435	3	Sable	5,0 ± 2,9	3,75 ± 0,16	54,6 ± 1,5
	Pessière à pin gris	PGEN	450	6	Sable loameux	14,6 ± 4,5	4,09 ± 0,39	40,8 ± 1,8
		ENPG1	465	5	Sable loameux	13,0 ± 4,6	3,68 ± 0,21	41,6 ± 2,7
		ENPG2	445	2	Sable loameux	14,3 ± 4,2	3,73 ± 0,04	39,5 ± 2,1
Épinette noire	Pessière	EN1	455	5	Sable loameux	23,0 ± 6,4	4,19 ± 0,08	42,7 ± 4,7
	(relief plat à ondulé)	EN2	495	3	Sable loameux	19,6 ± 6,0	3,64 ± 0,06	44,5 ± 12,9
	Pessière	ENp1	510	17	Sable loameux	20,5 ± 6,0	3,64 ± 0,09	-
	(relief de colline)	ENp2	550	20	Sable loameux	20,8 ± 4,5	3,82 ± 0,08	47,5 ± 6,9
Sapin baumier et bouleau à papier	Sapinière à épinette noire	SBEN	480	20	Loam sableux	14,5 ± 7,3	3,98 ± 0,26	30,8 ± 3,9
	Sapinière à bouleau à papier	SBBP1	515	24	Sable loameux	13,4 ± 4,8	4,06 ± 0,41	24,9 ± 0,9
		SBBP2	545	32	Sable loameux	7,6 ± 2,20	3,87 ± 0,12	33,04 ± 6,4
		SBBP3	590	18	Loam sableux	13,8 ± 5,5	4,03 ± 0,20	27,7 ± 5,3
	Bétulaie	BP1	500	20	Loam sableux	13,8 ± 4,4	3,72 ± 0,31	28,2 ± 5,4
		BP2	565	30	Sable loameux	9,2 ± 2,9	3,60 ± 0,07	28,8 ± 4,6

(> 20) à cause de la lente décomposition de la matière organique qui diminue la disponibilité de l'azote, nécessaire à la croissance des végétaux.

4.2. Dynamique forestière à court terme

4.2.1. Échelle de la station

Composition forestière

Les stations se distinguent entre elles sur la base de leur composition spécifique (figure 3). La surface terrière du pin gris est faible et ne dépasse pas 12 m²/ha. La régénération des espèces arborescentes des stations associées au pin gris est assurée exclusivement par l'épinette noire. Cette dernière couvre plus de 90 % de la surface terrière des pessières (EN1, EN2, ENp1 et ENp2). L'espèce est abondante aussi dans les pessières à pin gris (PGE, ENPG1 et ENPG2) et dans la sapinière à épinette noire (SBEN), mais elle est plutôt rare dans les sapinières à bouleau à papier (SBBP1, SBBP2 et SBBP3) et les bétulaies (BP1 et BP2). Le sapin baumier abonde dans les sapinières à bouleau à papier et la sapinière à épinette noire. Il est également présent dans le sous-étage des pessières qui occupent les versants de collines de même que dans celui des bétulaies. Le bouleau à papier domine le couvert arborescent des bétulaies. On l'observe aussi sporadiquement dans les sapinières à bouleau à

papier, la sapinière à épinette noire et les pessières. L'espèce semble déjà avoir été plus abondante dans les sapinières à bouleau à papier SBBP2 et SBBP3, dont la surface terrière des tiges mortes est de 20 et 16 m²/ha. Quelques plantules de bouleau à papier ont été dénombrées dans les trois stations de la sapinière à bouleau papier ainsi que dans la bétulaie BP2. Enfin, l'épinette blanche, qui est peu fréquente dans la région, a été observée uniquement dans la sapinière à épinette noire, où elle couvre 10 % de la surface terrière.

L'analyse en composante principale permet d'associer les principales espèces de sous-bois aux stations d'échantillonnage (figure 4). Les stations associées au pin gris sont caractérisées par la présence des lichens (*Cladonia* sp.) et des *Vaccinium*. La station ENPG2 fait cependant exception. La composition du sous-bois de cette station s'apparente davantage à celle qui caractérise les pessières occupant les reliefs plats à ondulés qui sont notamment dominées par le kalmia à feuilles étroites (*Kalmia angustifolia* L.) et le thé du Labrador (*Rhododendron groenlandicum* Oeder Kron & Judd). Les mousses hypnacées, dont l'hypne de Schreber (*Pleurozium schreberi* (Brid) Mitt.), l'hypne plumeuse (*Ptilium crista-castrensis* (Hedw.) De Not.) et les sphaignes

Figure 3 : Surface terrière (m²/ha) occupée par les tiges vivantes (a) et mortes (b), et nombre de plantules (c) dénombrées dans chaque station

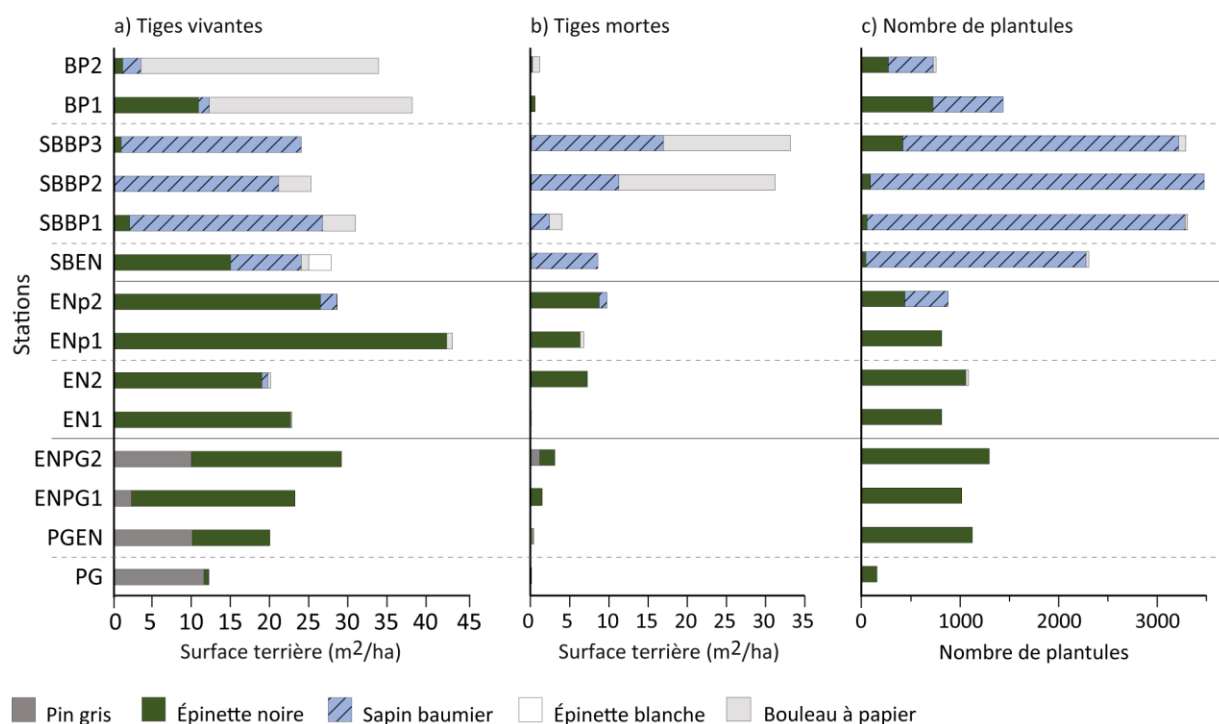
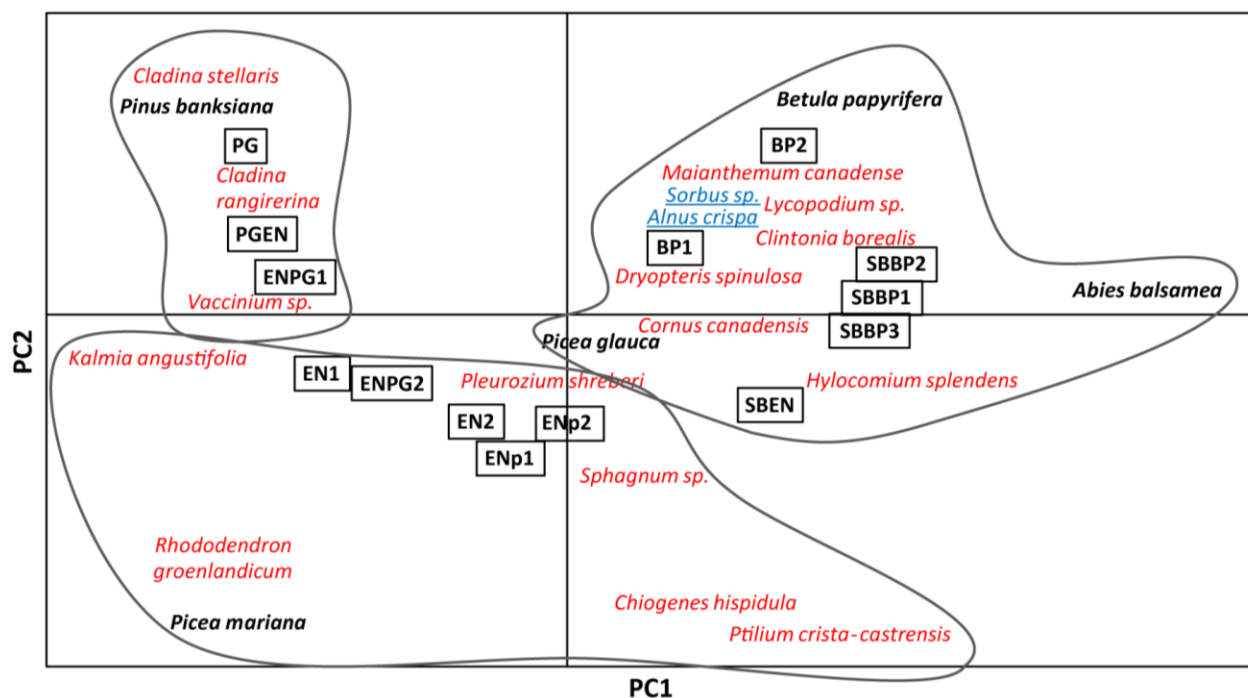


Figure 4 : Caractérisation des stations selon une analyse en composantes principales (cadrage de type 1). Les espèces arborescentes sont représentées en noir, les espèces arbustives soulignées en bleu et les espèces de sous-bois en rouge. Les stations d'échantillonnage sont indiquées en noir, encadrées.



(*Sphagnum* sp.), de même que le chiogène hispidule (*Gaultheria hispidula* (L.) Muhl. ex Bigelow) sont associés aux pessières occupant les versants de collines. Dans les stations associées au sapin baumier et au bouleau à papier, on distingue les sapinières où abondent l'hylocomie brillante (*Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G.) et le cornouiller du Canada (*Cornus canadensis* L.). Quant aux bétulaies, elles se caractérisent par un sous-bois diversifié renfermant des espèces herbacées, dont la dryopteride spinuleuse (*Dryopteris carthusiana* (Vill.) H.P. Fuchs), la clintonie boréale (*Clintonia borealis* Aiton (Raf.)), la maïanthème du Canada (*Maianthemum canadense* Desf.), les lycopodes (*Lycopodium* sp.), de même que le sorbier décoratif (*Sorbus decora* C.K.Schneid.) et l'aulne crispé.

Structure et âge des peuplements

La structure de taille des peuplements associés au pin gris et à l'épinette noire adopte une forme en cloche s'apparentant à une distribution normale. Les tiges de pin gris adoptent une telle distribution dans les stations PG (figure 5a), PGEN, ENPG1 et ENPG2 (figure 5b). Peu de tiges sont présentes dans les classes de diamètre inférieures (0 à 6 cm). Leur nombre augmente ensuite pour se stabiliser dans les classes intermédiaires (6 à 14 cm), puis pour décroître graduellement dans les classes de diamètre supérieures (> 14 cm). Une structure similaire caractérise la distribution des tiges vivantes d'épinette noire des stations ENp1 (figure 5c), ENp2 et EN2. Les stations PGE, ENPG1, ENPG2 et EN1 renferment plusieurs tiges d'épinette noire dans les classes de diamètre inférieures, leur nombre décroît dans les classes de diamètre supérieures.

La structure de taille des peuplements associés au sapin baumier et au bouleau à papier diffère selon leur composition. La distribution des tiges de sapin baumier des stations de la sapinière à bouleau à papier (SBBP1, SBBP2 et SBBP3 [figure 5d]) et de la sapinière à épinette noire (SBEN) correspond à une distribution en J inversé, ou

exponentielle négative, qui laisse penser à l'atteinte d'un équilibre entre la régénération, la croissance et la mortalité des individus par sénescence. La distribution des quelques tiges d'épinette noire est généralement concentrée dans les classes de diamètre inférieures à l'exception de la station SBEN où les tiges d'épinette noire sont surtout distribuées dans les classes de diamètre supérieures (18 à 40 cm). La structure de taille des bouleaux à papier vivants des bétulaies (BP1 et BP2 [figure 5e]) correspond à une forme en cloche similaire à celle observée dans les stations à pin gris et à épinette noire. Ces stations renferment quelques tiges de sapin baumier et d'épinette noire réparties dans les classes de diamètre inférieures. La distribution des tiges de bouleau à papier mortes des stations SBBP2 (figure 5f) et SBBP3 correspond aussi à une distribution en cloche.

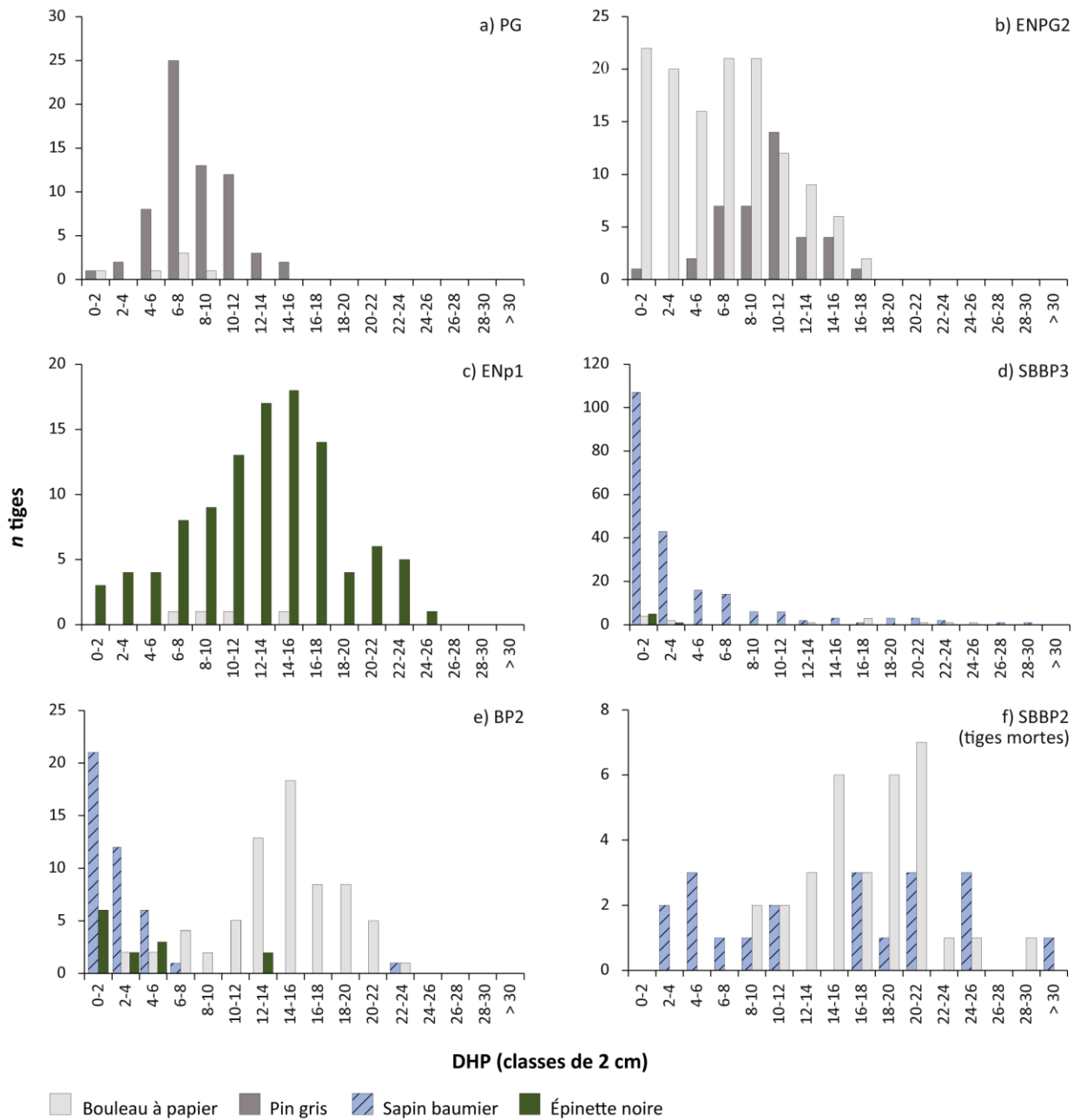
L'âge des arbres échantillonnés de la plupart des stations indique qu'il y a eu une brève période d'établissement (< 10 ans) après feu, correspondant à quelques années près à l'âge du dernier feu. Dans les stations PG, ENPG1, ENPG2, EN1, ENp1, BP1 et BP2, l'âge du feu a été déterminé précisément grâce aux cicatrices de feu formées respectivement en 1870, 1894, 1915, 1917 et 1919 (tableau 2). L'écart de quelques années seulement entre l'âge des tiges d'épinette noire (EN1, ENPG2, SBEN), de pin gris (PGS, ENPG1) et de bouleau à papier (SBBP2 et SBBP3) donne à penser qu'elles se seraient établies à la suite de feux survenus vers 1715, 1810, 1836, 1852, 1864 et 1872. Dans les stations EN2, ENp2 et SBBP1, où l'établissement des tiges échantillonnées s'étend sur quelques décennies, les plus vieux arbres se sont respectivement établis vers 1833, 1840 et 1815, ce qui permet d'estimer le temps minimal écoulé depuis le dernier feu.

4.2.2. Échelle régionale

Cartographie des feux

Les feux survenus dans la région au cours des 150 dernières années ont été cartographiés et datés. Les plus anciens feux datent des décennies 1860

Figure 5 : Structure de taille (DHP) des tiges vivantes (bouleau à papier, pin gris, sapin baumier et épinette noire) des stations PG (a), ENPG2 (b), ENp1 (c), SBBP3 (d) et BP2 (e) et des tiges mortes de la station SBBP2 (f)

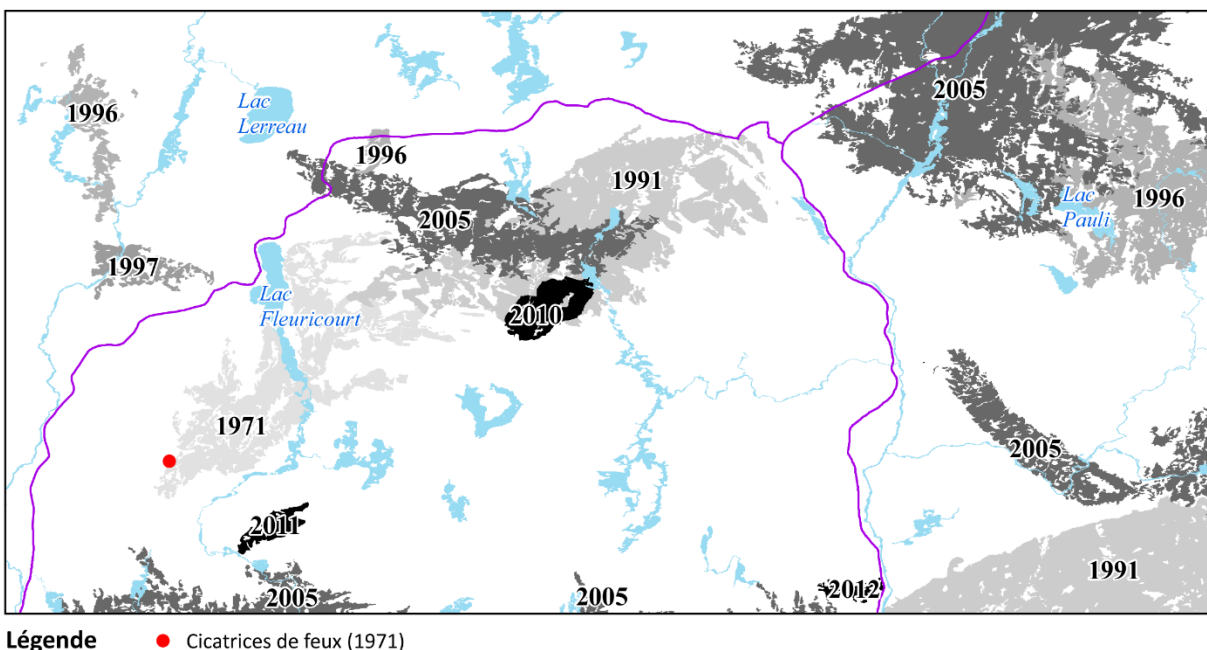


Au cours des 150 dernières années, des feux d'importance ont affecté le couvert forestier de façon récurrente environ tous les 70 ans. Les feux survenus au cours des décennies 1850-70, 1910 et 1990-2000 ont couvert de grandes superficies (figure 8). On estime à 0,5 % de la région d'étude la surface incendiée annuellement, ce qui correspond à une période de rotation de 200 ans. Rappelons qu'il s'agit d'une période de rotation maximale, puisque les feux de la fin du 19^e siècle

Groupe	Stations	Datation dernier(s) feu(x)
Pin gris	PG	1915 ¹ , 1852 ¹
	PGEN	1917 ¹
	ENPG1	1917 ¹ , 1853 ²
	ENPG2	1917 ¹ , 1836 ²
Épinette noire	EN1	1917 ¹ , 1864 ²
	EN2	1833 ²
	ENp1	1870 ¹
	ENp2	1840 ³
Sapin baumier et bouleau à papier	SBEN	1873 ²
	SBBP1	1815 ³
	SBBP2	1820 ²
	SBBP3	1725 ²
	BP1	1919 ¹
	BP2	1919 ¹

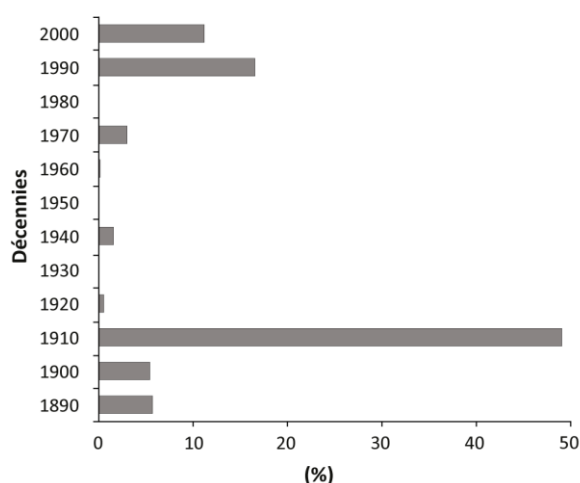
Légende ▲ Arbres dominants ● Cicatrices de feux

Figure 7 : Cartographie des feux survenus dans la région d'étude depuis 1971. La date du feu de 1971 a été corroborée à l'aide de cicatrices (point rouge).



et du début du 20^e siècle étaient probablement de plus grandes tailles. Si l'on fait abstraction des coupes forestières survenues dans la région, le paysage naturel aujourd'hui, en 2016, serait composé de jeunes forêts (< 50 ans), de forêts prématures (50 à 100 ans), de forêts matures (100 à 150 ans) de vieilles forêts (plus de 150 ans) occupant respectivement 26 %, 29 %, 18 % et 27 % du paysage forestier.

Figure 8 : Proportion (%) de la région incendiée par décennie



Composition, taille et datation des vieilles forêts

Les vieilles forêts sont surtout composées de peuplements d'épinette noire (79 %) et de quelques pessières à sapin baumier et de sapinières à épinette noire (14 %). On y relève également, dans des proportions moindres, quelques sapinières à bouleau à papier (4 %), des pessières à pin gris (2 %) et des bétulaies (1 %).

L'analyse du paysage naturel, exempt de coupes, révèle que la distribution de taille des vieilles forêts suit une distribution exponentielle négative (figure 9). La majorité d'entre elles (95 %) forment des îlots de moins de 100 ha. Toutefois, elles comptent pour seulement 28 % de la superficie des vieilles forêts. Près de la moitié de la superficie des vieilles forêts forme des îlots de taille variant entre 100 et 1000 ha ($n = 46$; 22 %) ou des petits massifs de taille variant entre 1000 et 10 000 ha ($n = 5$; 22 %). Enfin, on relève un seul grand massif de vieille forêt dans la région dont la taille est supérieure à 10 000 ha.

Figure 9 : Distribution de la taille des vieilles forêts (> 150 ans)

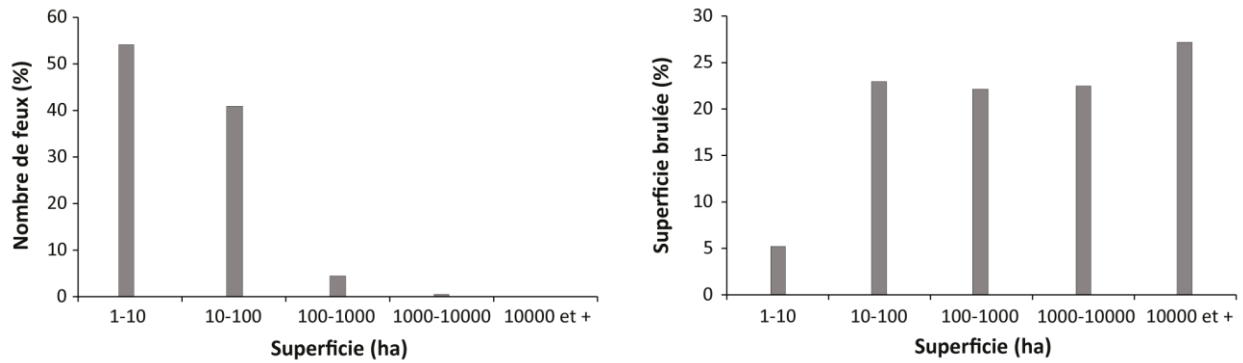
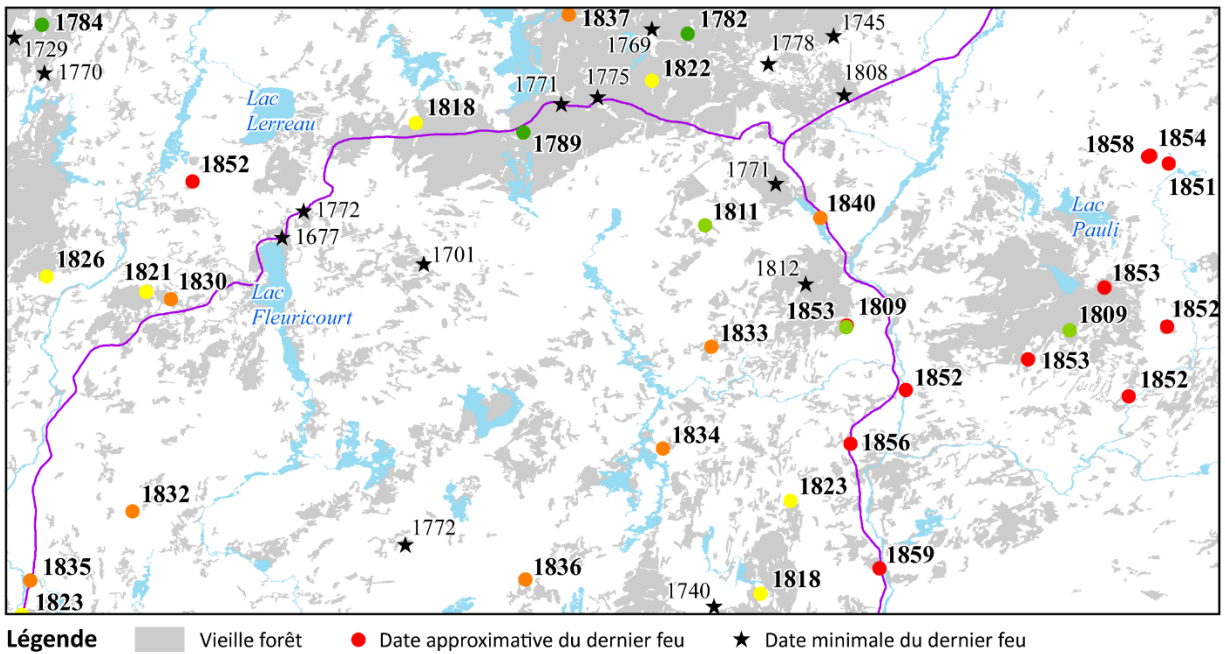


Figure 10 : Cartographie des vieilles forêts (trame de gris). Les points présentent les stations d'échantillonnage qui ont un faible écart d'âge entre les tiges, ce qui indique qu'elles se seraient établies à la suite de feux survenus au cours des décennies 1780 (vert foncé), 1800 (vert pâle), 1820 (jaune), 1830 (orange) et 1850 (rouge). Les étoiles représentent les stations d'échantillonnage dont l'écart d'âge des tiges s'étend sur plusieurs années. Il s'agit donc de la date minimale du dernier feu.



Le dénombrement des cernes de croissances des arbres échantillonnés dans les vieilles forêts indique que plusieurs d'entre elles proviennent de feux survenus durant la première moitié du 19^e siècle. La plupart de ces forêts se sont établies à la suite de feux survenus au cours des décennies 1780, 1800, 1810, 1830 et 1850. D'après la répartition des relevés d'inventaire, ces feux auraient couvert de grandes étendues comparables à celles des feux survenus plus récemment dans la région (figure 10). Les

données d'inventaire permettent également de confirmer la présence de quelques forêts âgées de plus de 200 ans. Cependant, le grand écart d'âge entre les tiges échantillonnées ne permet pas de déterminer précisément le temps écoulé depuis le dernier feu dans ces stations. Il est reconnu qu'au-delà de 200 ans, les arbres dominants ont atteint la limite de longévité moyenne propre à chaque espèce, ce qui rend incertaine la datation des feux basée sur la structure d'âge des peuplements (Payette 2010).

Tableau 3 : Temps écoulé depuis le dernier feu (TEDF) calculé à l'aide de l'âge des plus vieux arbres (*), de la datation au radiocarbone des charbons de bois de l'horizon organique de surface (†) et d'une cicatrice de feu (‡)

Types de peuplement	Stations	Âge des plus vieux arbres (années)	Datations des charbons de bois (années)	TEDF
Pessière	V-EN1	314	835	835†
	V-EN2	172	165	172*
	V-EN3	322	125	145‡
	V-EN4	270	450	450†
Sapinière	V-SB1	176	370	370†
	V-SB2	244	645	645†
	V-SB3	203	265	265†
	V-SB4	254	255	254*

Les datations au radiocarbone des charbons de bois échantillonnés dans les quatre pessières et les quatre sapinières anciennes (figure 1) ont révélé que certaines d'entre elles ont échappé aux feux pendant plusieurs centaines d'années. Les plus vieux arbres échantillonnés dans les pessières se sont établis entre 1693 et 1843, ce qui laisse croire qu'aucun feu ne serait survenu dans ces forêts depuis au moins 172 ans (tableau 3). Les datations au radiocarbone confirment l'état d'ancienneté de ces forêts. À l'exception du site V-EN3 qui a été partiellement affecté par un feu survenu en 1870, les stations V-EN1, V-EN2 et V-EN4, n'auraient pas été incendiées depuis 835, 175 et 450 ans. Dans les sapinières, les plus vieux arbres échantillonnés se sont établis entre 1761 et 1823. Selon les datations des charbons de bois, le temps écoulé depuis le dernier feu excéderait l'âge des plus vieux arbres dans les stations V-SB1 et V-SB2, (370 et 645 ans) et serait similaire dans les stations V-SB3 et V-SB4 (~250 ans).

4.3. Dynamique forestière à long terme

4.3.1. Échelle de la station

Répertoire des charbons de bois

La composition botanique des charbons de bois comprend l'épinette (*Picea* sp.), le pin gris, le sapin baumier, le bouleau (*Betula* sp.) et le

mélèze laricin (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch) (figure 11). Plusieurs charbons, surtout ceux provenant du sol minéral, n'ont pu être identifiés en raison de leur petite taille et de leur état dégradé. Ceux qui ont pu être identifiés au genre ou à l'espèce sont représentatifs de la composition actuelle des peuplements. La composition botanique des charbons de chacune des stations est semblable entre les compartiments de surface et du sol minéral.

Les charbons de pin gris sont uniquement présents dans les stations associées à cette espèce. En plus du pin gris, l'assemblage botanique des charbons de bois des pessières à pin gris est surtout composé d'épinette. On y relève également quelques charbons de bouleau et de sapin baumier. L'assemblage botanique des charbons des pessières est dominé par l'épinette. Le sapin baumier est également présent, particulièrement dans les pessières occupant les versants de collines, où il comprend près de 10 % des charbons. Le sapin baumier domine l'assemblage botanique des charbons des sapinières et des bétulaies. Les charbons de bouleau et d'épinette sont aussi bien représentés dans ces stations. Quelques charbons de mélèze laricin ont été répertoriés dans les pessières et dans la station ENPG2.

Figure 11 : Composition botanique des charbons de bois de chaque station (exprimé en %) dans les compartiments de surface (a) et de sol minéral (b)

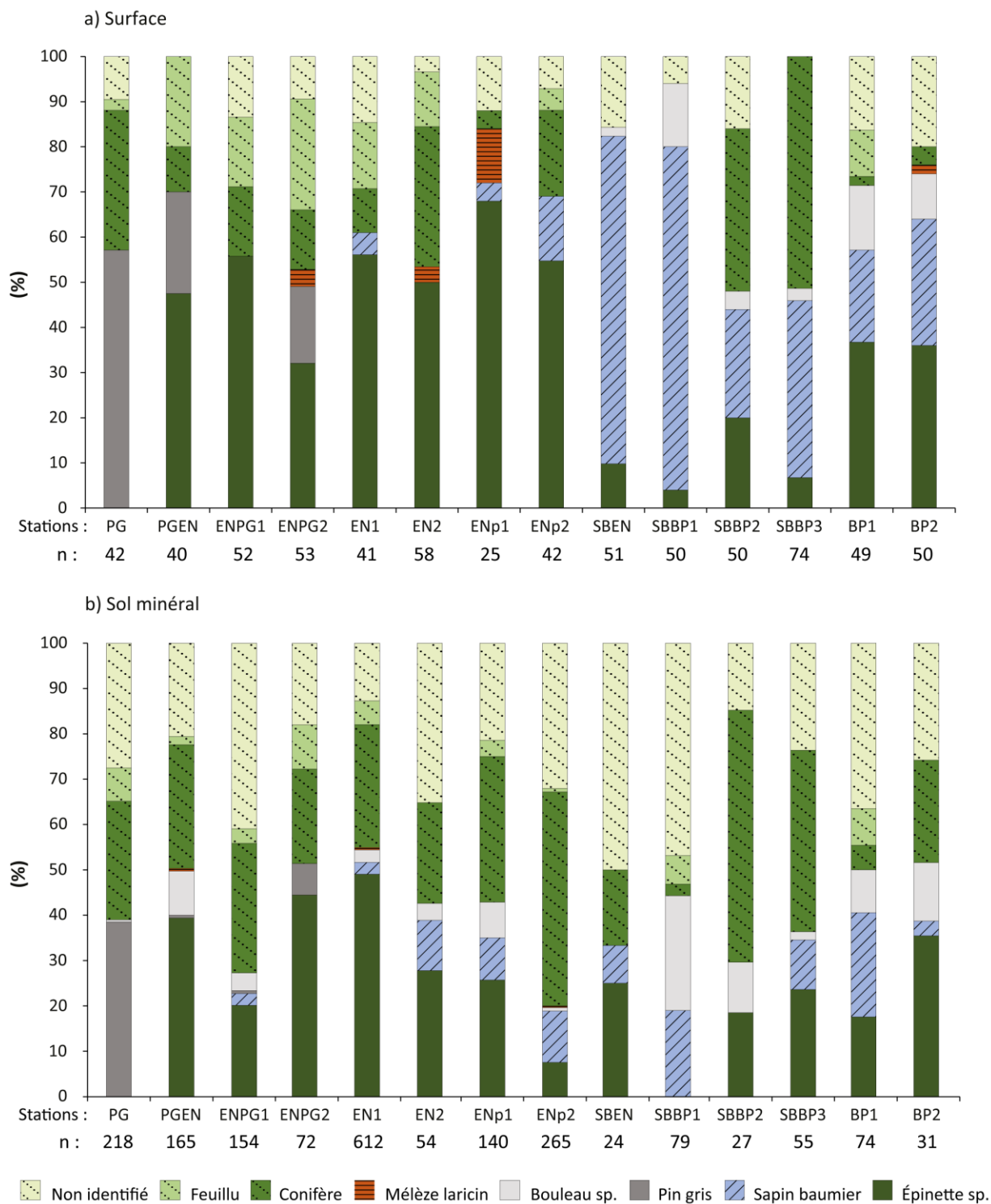


Tableau 4 : Date du plus vieux feu (DPVF), nombre de feux échantillonnés, nombre de feux estimés à l'aide des courbes d'accumulation et intervalle de feu moyen estimé (Im) de chacune des stations au cours de l'Holocène et des 1000 dernières années

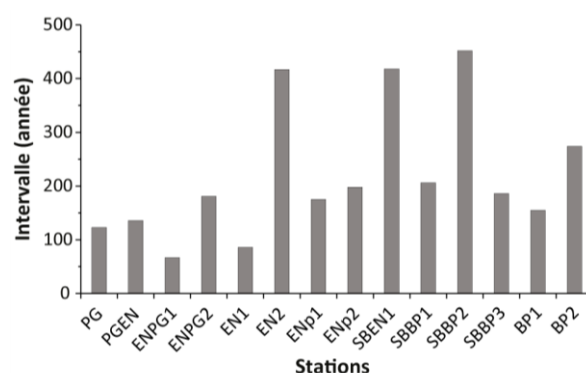
Groupe	Station	7600 AA (holocène)					1000 AA		
		nb charbons datés	DPVF*	nb feu éch.	nb feu est.	Im	nb feu éch.	nb feu est.	Im
Pin gris	PG	45	3300	12	15	235	8	8	125
	PGEN	45	5665	20	27	220	5	6	135
	ENPG1	45	6355	26	40	165	10	14	65
	ENPG2	45	4490	13	13	365	6	6	180
Épinette noire	EN1	45	7585	25	37	210	8	9	85
	EN2	45	5020	14	15	355	3	3	415
	ENp1	45	4830	15	17	305	4	5	175
	ENp2	45	4730	12	12	410	5	5	200
Sapin baumier et bouleau à papier	SBEN1	27	3610	8	8	460	3	3	420
	SBBP1	30	4020	12	14	300	5	5	205
	SBBP2	27	3625	9	10	375	3	3	450
	SBBP3	30	3425	12	13	260	5	5	185
	BP1	30	6800	12	15	495	5	5	155
	BP2	30	5290	14	18	300	4	4	275

* DPVF : date du plus vieux feu

Histoire des feux

La datation des charbons de bois a permis de détecter entre 8 et 26 feux survenus depuis les 7600 dernières années selon les différentes stations (tableau 4, annexe 2). Leur nombre est généralement plus élevé dans les stations associées au pin gris et à l'épinette noire (entre 12 et 26) comparativement à celles associées au sapin baumier et au bouleau à papier (entre 8 et 14). Cette tendance peut être expliquée en partie par le fait qu'un plus grand nombre de charbons (n = 45) ont été datés dans le premier groupe comparativement au second (n = 27 à 30). L'évaluation du nombre de feux estimé à l'aide des courbes d'accumulation permet d'atténuer cet effet. Selon ces courbes, on estime qu'entre 15 et 40 feux seraient survenus dans les stations associées au pin gris et à l'épinette noire au cours de l'Holocène et entre 8 et 18 feux dans celles associées au sapin baumier et au bouleau à papier. Les stations PGEN, ENPG1 et EN1 sont celles qui ont enregistré le plus de feux avec un nombre de feux respectif estimé de 27, 40 et 37. L'intervalle de feu moyen estimé (Im) concernant ces trois stations varie entre 165 et 220 ans. Il se situe autour de 300 ans dans le cas des autres

Figure 12 : Intervalle de feu moyen estimé de chaque station au cours des 1000 dernières années



stations, à l'exception des stations PG et SBBP3, où il est de 235 et 260 ans.

L'histoire des feux de la période couvrant les 1000 dernières années a été examinée puisque le nombre de feux répertoriés est généralement équivalent au nombre de feux estimés par les courbes d'accumulation. On distingue deux groupes quant au nombre de feux répertoriés et à l'intervalle de feu moyen (figure 12). Le premier groupe est formé des stations associées au pin gris et de la station EN1. On estime qu'entre 6 et 14 feux seraient survenus dans ces stations au cours du dernier 1000 ans, soit un intervalle de

feu moyen estimé variant entre 65 et 180 ans (tableau 4). Le second groupe est formé des autres stations. De 3 à 5 feux seraient survenus au cours de cette période, soit un intervalle de feu moyen estimé variant entre 155 et 450 ans. Cet intervalle est particulièrement long dans les stations EN2, SBEN et SBBP2 où il est estimé respectivement à 415, 420 et à 450 ans.

Abondance et composition botanique des charbons de bois au cours du temps

D'après les charbons de bois identifiés, des forêts formées des mêmes espèces que les peuplements actuels auraient prévalu depuis 5000 ans dans les différentes stations d'échantillonnage (figure 13). Toutefois, le pin gris semble être plus abondant dans la région depuis 2500 ans. Une seule pièce de charbon de cette espèce a été datée avant cette période (4500 ans AA). Les pessières à pin gris se sont probablement formées progressivement à partir d'un assemblage boréal représenté surtout par l'épinette et le bouleau.

4.3.2. Échelle de la région

Histoire régionale des feux

Une analyse de la distribution dans le temps de toutes les datations au ^{14}C a permis d'évaluer la variation du régime des feux de la région au cours du temps. Les feux sont présents dans la région depuis au moins 7600 ans, c'est-à-dire peu de temps après le retrait du glacier. Le régime de feu semble être plus soutenu depuis 5000 ans AA (figure 14). La presque totalité des charbons de bois datés (98 %, $n = 514$) est plus jeune que 5000 ans; seulement 11 charbons ont permis de dater des feux survenus avant 5000 ans AA. Le nombre de charbons de bois du compartiment de surface diminue avec le temps. En effet, plus de 94 % des charbons de bois de ce compartiment ont moins de 2000 ans; le plus vieux charbon est un conifère indéterminé de la station ENP1 datant de 3600 ans AA. Cette tendance peut être attribuée à la dégradation naturelle des charbons et au risque que ceux-ci, exposés aux feux subséquents, soient consumés et réduits en cendres. La distribution de l'abondance des charbons des compartiments de surface et du sol minéral

réunis est fortement corrélée avec une exponentielle négative ($R^2 = 0,8131$, $p < 0,001$). Cette forte corrélation laisse croire que la dégradation des charbons de surface est la principale explication de la tendance décroissante de l'abondance des charbons en fonction du temps. Une fois enfouis dans la matrice du sol, les charbons sont préservés de la dégradation par les feux. Ainsi, la distribution des charbons du compartiment minéral reflète la tendance générale de la fréquence des feux à l'échelle de la région. La distribution des charbons de bois dans le sol minéral ne montre pas de variations majeures depuis 5000 ans, laissant croire à un apport constant de charbons dans le sol qui serait étroitement relié à un régime des feux stable. Par conséquent, la fréquence des feux calculée grâce à l'histoire des 1000 dernières années, où elle est la plus complète pour toutes les stations, reflète probablement la fréquence des feux des 5000 dernières années.

Selon le regroupement de tous les événements de feux survenus à l'échelle régionale, 84 feux ont été détectés au cours de l'Holocène. Durant les 5000 dernières années, les feux sont survenus de façon régulière et continue. Cinquante-six événements de feux ont été détectés dans trois stations ou plus et quinze dans quatre stations ou plus (Annexe 3).

Histoire postglaciaire de la végétation

Tourbière TB2

La carotte sédimentaire de la tourbière TB2 a une épaisseur de 312 cm. Une date de 7760 ans AA a été obtenue au contact du dépôt minéral et du dépôt organique correspondant au début de l'accumulation de la tourbe. Au total, 40 niveaux de tourbe ont été analysés et 47 taxons polliniques (arbres, arbustes, herbes, plantes vasculaires) ont été identifiés. La plupart des taxons sont peu représentés. Le diagramme pollinique a été subdivisé en quatre zones d'assemblage pollinique principales (zones TB2-I à TB2-IV) (figure 15).

À la base du diagramme, la zone TB2-I (312-284 cm; 7760 à ca. 7300 ans AA), qui ne comprend que quatre spectres polliniques, représente une

Figure 13 : Nombre de charbons des différents taxons en fonction du temps (classes de 200 ans) cumulé pour chaque type de peuplements. Les charbons qui n'ont pu être identifiés ne sont pas présentés.

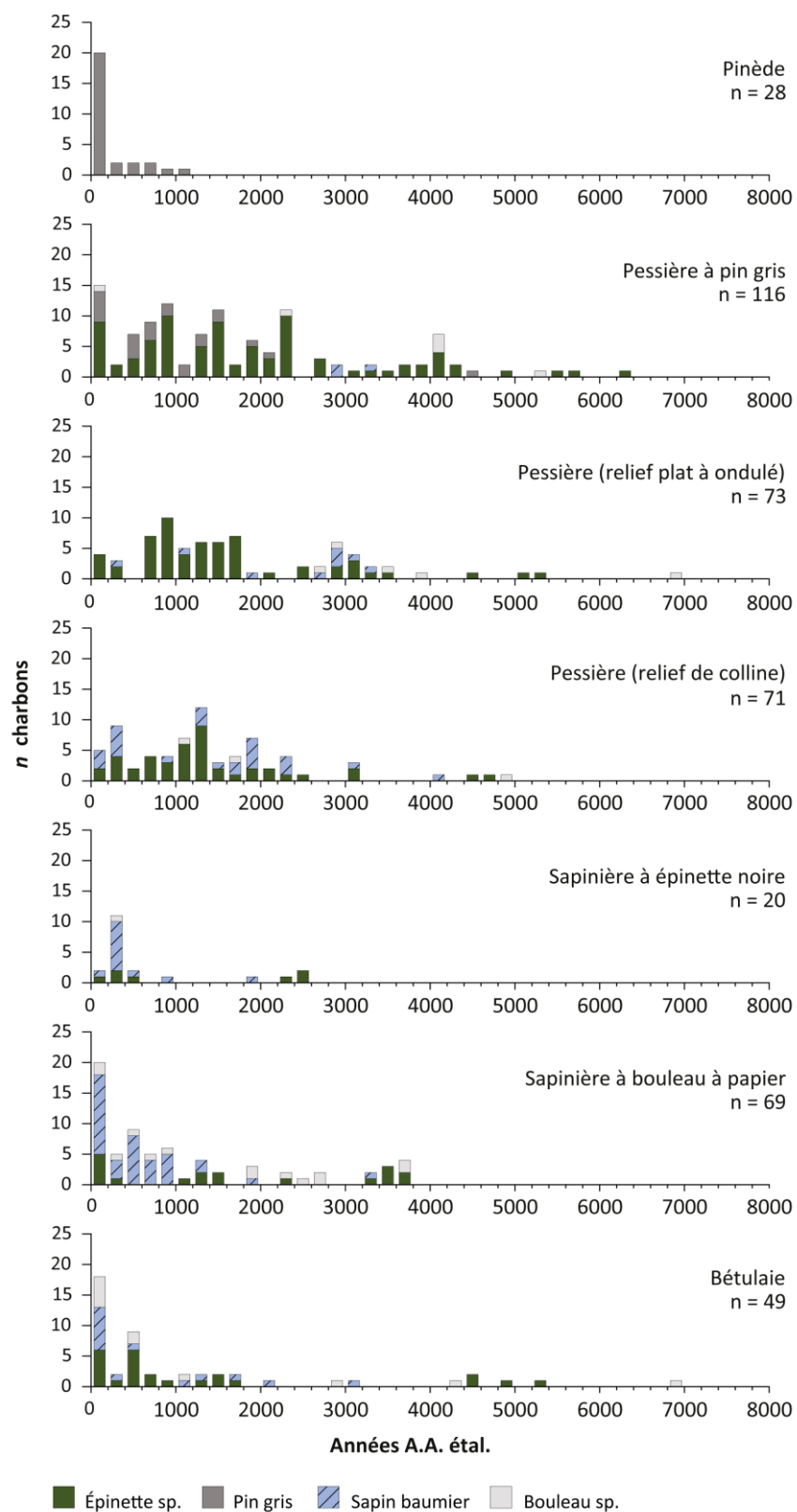
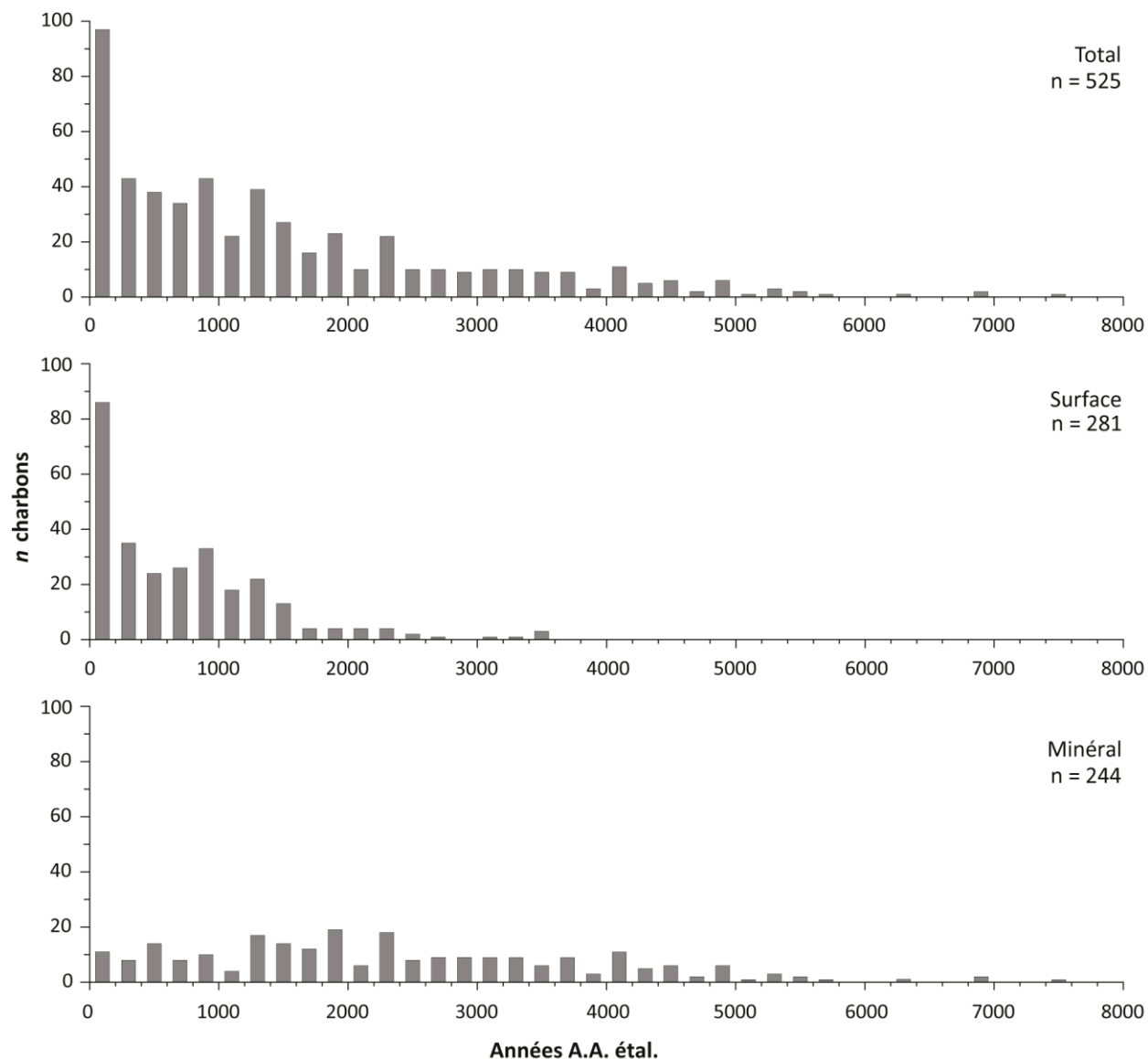


Figure 14 : Nombre de charbons de bois datés dans toutes les stations en fonction du temps (classe de 200 ans) selon leur emplacement dans le compartiment de surface (matière organique) et dans celui du sol minéral



durée de quelques siècles (environ 450 ans). Les concentrations polliniques sont les plus faibles du profil (à l'exception de la zone TB2-IV), mais elles augmentent graduellement vers le sommet de la zone (moyenne : 95 600 grains cm^{-3}). Les assemblages polliniques sont surtout dominés par le bouleau (42-55 %). Il est possible qu'il s'agisse d'un mélange de bouleau à papier et de bouleau glanduleux (*Betula glandulosa* Michx.). La représentation de l'épinette oscille entre 8 et 13 %, ce qui est relativement faible. On note la présence fort probable à l'échelle régionale de

deux espèces habituellement sous-représentées, soit le peuplier (*Populus* sp.) et le sapin baumier. Parmi les arbustes et les herbes, les pourcentages de l'aulne (*Alnus* sp.) sont aussi relativement élevés (12 %), de même que ceux de certaines espèces herbacées (*Poaceae*). Les assemblages polliniques de la zone TB2-I permettent de croire qu'il y avait un couvert végétal relativement ouvert correspondant à la constitution des premières forêts. Il est possible qu'une partie du pollen enregistré ait été de source lointaine.

Figure 15 : Diagramme pollinique en pourcentage des taxons vasculaires terricoles les plus importants de la tourbière TB2

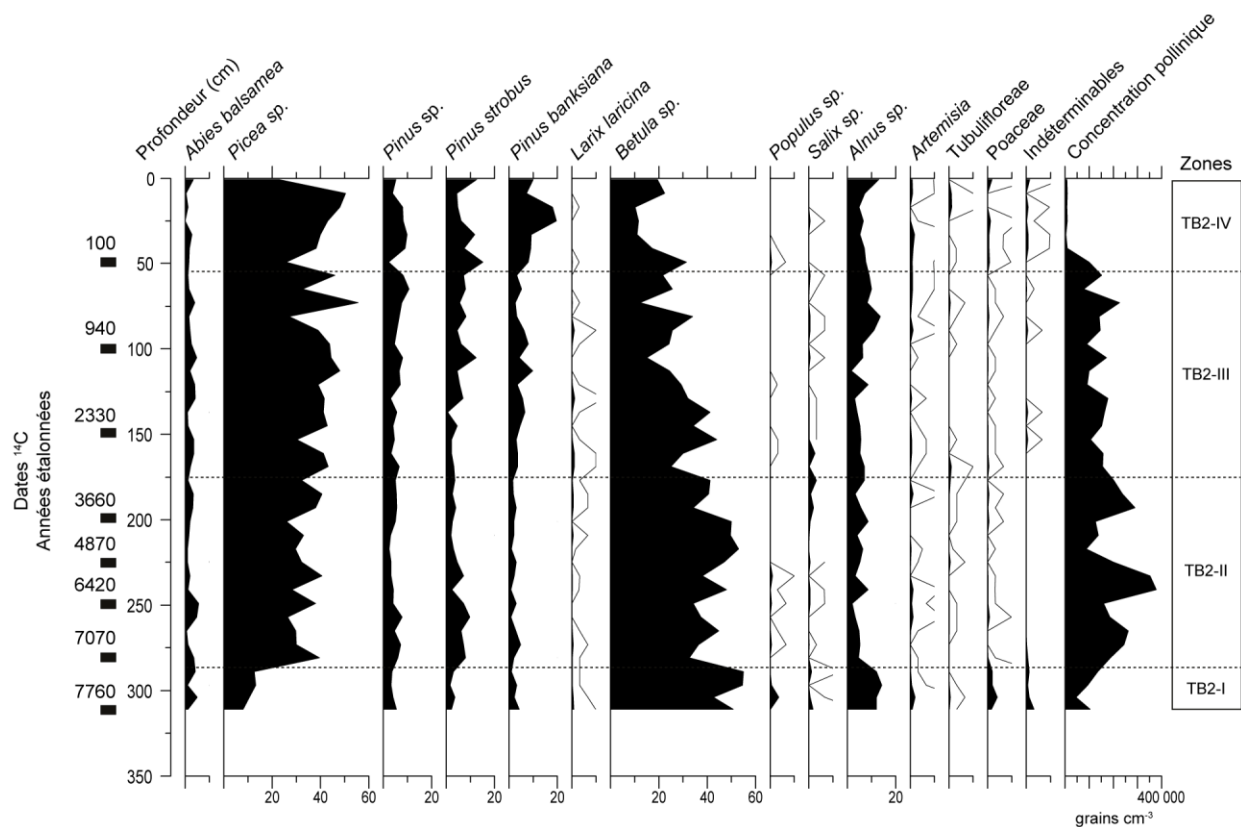
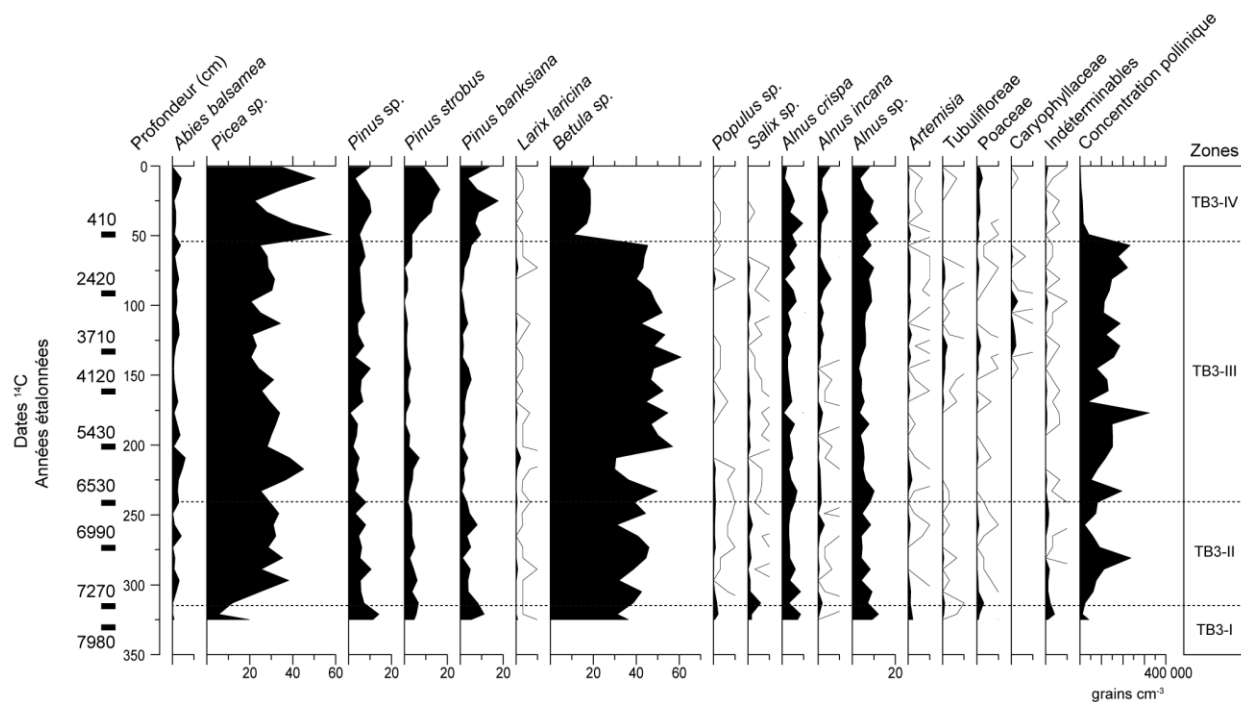


Figure 16 : Diagramme pollinique en pourcentage des taxons vasculaires terricoles les plus importants de la tourbière TB3



Les assemblages des zones TB2-II (284-172 cm ; ca. 7300 à ca. 2920 ans AA) et TB2-III (172-52 cm ; ca. 2920 à 100 ans AA) sont relativement semblables et elles représentent la quasi-totalité de l'histoire de la végétation régionale. Les assemblages polliniques sont caractérisés par des valeurs relativement élevées des concentrations polliniques (moyenne : 179 250 grains cm⁻³). Les deux zones sont dominées par l'épinette (fort probablement l'épinette noire), dont la représentation moyenne est plus importante dans la zone III (41 %) comparativement à la zone II (33 %), alors que le bouleau (fort probablement le bouleau à papier) montre une tendance inverse à celle de l'épinette (28 % dans la zone III et 42 % dans la zone II). Bien qu'elle soit relativement faible, la représentation pollinique du sapin baumier est uniforme dans les deux zones (2,6 %) et indique sa présence régionale. Une caractéristique qui distingue les deux zones est la légère augmentation du pin gris dans la zone III (5 %), qui est deux fois supérieure à celle de la zone II (2,3 %).

Bien qu'elle soit représentée sur une épaisseur de 50 cm, la zone TB2-IV au sommet du diagramme pollinique (50-0 cm) ne correspond qu'au dernier siècle. Les concentrations polliniques y sont très faibles et généralement inférieures à 10 000 grains cm⁻³, en raison du caractère peu décomposé de la tourbe, ce qui a eu un effet de dilution du pollen dans la matière organique. La principale caractéristique de cette zone concerne la nette augmentation du pin gris (moyenne : 12 %), qui atteint une valeur maximale de plus de 19 % dans deux niveaux (16 et 24 cm). La chute de la représentation pollinique du bouleau amorcée dans la zone III se poursuit dans la zone IV (18 %).

Tourbière TB3

La carotte sédimentaire de la tourbière TB3 a une épaisseur de 330 cm. Une date de 7980 ans AA a été obtenue au contact du dépôt minéral et du dépôt organique (330 cm). Au total, 42 niveaux ont été analysés et 43 taxons polliniques ont été identifiés, la plupart d'entre eux étant peu représentés tout au long de la séquence

sédimentaire. Le spectre pollinique le plus profond se situe à 324 cm (la section entre 324 et 330 cm comprend une quantité insuffisante de grains de pollen). Le diagramme pollinique a été subdivisé en quatre zones d'assemblage pollinique principales (zones TB3-I à TB3-IV) (figure 16).

À la base du diagramme pollinique, la zone TB3-I (324-316 cm ; ca. 7550 à ca. 7250 ans AA) n'est représentée que par deux spectres polliniques. Les concentrations polliniques y sont très faibles (moyenne : 28 200 grains cm⁻³). Le pollen arboréen enregistré à cette époque (épinette, pin et pin gris) provient probablement en grande partie de source lointaine, mais certains arbres et arbustes, comme le peuplier et le saule (*Salix* sp.), étaient déjà présents dans la région. La représentation pollinique de quelques plantes herbacées (*Artemisia*, *Poaceae*) témoignerait de la présence passée d'un milieu ouvert.

Dans la zone TB3-II (316-244 cm ; ca. 7250 à 6530 ans AA), l'augmentation des concentrations polliniques témoigne de la densification et de la fermeture progressive du couvert forestier. Les assemblages polliniques sont essentiellement dominés par le pollen d'épinette (moyenne : 29 %) et de bouleau (40 %). Chez les arbres, la représentation du pin gris suffisamment élevée confirme sa présence régionale (5 %). Celle du sapin baumier est quelque peu erratique, mais il était probablement présent dans les environs de la tourbière. Chez les arbustes, on note la présence du saule et des aulnes.

La zone TB3-III (244-52 cm; 6530 à 410 AA) est la plus longue de toutes les zones (environ 6000 ans). C'est aussi celle qui comprend le plus grand nombre de spectres polliniques (24). Bien que la composition des spectres polliniques soit relativement semblable à celle de la zone précédente, elle se distingue par les éléments suivants : une représentation plus soutenue du sapin baumier (moyenne : 2,5 %), une courbe pollinique de l'épinette montrant quelques fluctuations (29 %), un pourcentage plus grand du bouleau (46 %) et une diminution du pin gris (2,5 %).

La zone TB3-IV, située au sommet du diagramme (52-0 cm ; 410 ans AA à aujourd'hui), correspond aux derniers siècles de l'histoire de la végétation. À l'instar du diagramme pollinique de la tourbière TB2, on y observe une nette reprise du pin gris (moyenne : 10 %), ce dernier atteignant un maximum de 18 % (24 cm), une augmentation du pourcentage de l'épinette (39 %) et une diminution marquée du bouleau (17 %). On observe aussi la représentation assez marquée du pin blanc (*Pinus strobus* L.) dans les 30 cm supérieurs du profil, phénomène plus ou moins évident dans la tourbière TB2. Enfin, les faibles concentrations polliniques résultent d'une dilution du pollen dans l'acrotelme de la tourbière.

5. Discussion

Les feux jouent un rôle déterminant dans la dynamique du paysage forestier de la pessière à mousses au nord du lac Saint-Jean. La cartographie des feux récents montre que près du trois quarts de la région étudiée a été incendiée au cours des 150 dernières années. La plupart des superficies incendiées proviennent de feux de grande taille, qui sont survenus au cours des décennies 1850, 1910 et 2000. Les forêts qui n'ont pas été incendiées au cours de cette période sont formées, en proportion équivalente, de petits îlots forestiers (< 1 km²) répartis dans la région, et de quelques massifs forestiers de petite taille (1 à 100 km²) qui occupent les secteurs d'altitude. La datation des arbres et des charbons de bois prélevés dans ces forêts indique qu'elles proviennent pour la plupart de feux survenus au début du 19^e siècle ou au cours du 18^e siècle. Toutefois, certains peuplements proviennent de feux plus anciens survenus il y a plus de 400 ans. Bien que l'on ne soit pas en mesure d'évaluer précisément leur taille, les forêts anciennes, âgées de plus de 200 ans, sont rares dans la région. Elles occupent de petites surfaces et elles sont confinées dans certains refuges topographiques défavorables au passage des feux (îles, bordure de lac et de tourbières, etc.).

Le plus vieux charbon de bois (âgé de 7580 ans) indique que les premiers feux sont survenus dans

la région peu de temps après la glaciation qui a été complétée vers 8000 ans AA (Occhietti et al. 2011). Des charbons de bouleau et d'épinette datant respectivement de 7000 ans et de 6300 ans AA confirment la présence de ces espèces dans les premières forêts de la région. Les dates respectives d'arrivée minimale du pin gris et du sapin baumier se situent vers 4800 et 4300 ans AA. Toutefois, selon les diagrammes polliniques, il est fort probable que ces deux espèces étaient présentes dans la région peu de temps après la glaciation.

Relativement peu de charbons ont été datés entre 7600 et 5000 ans AA, après quoi on observe une augmentation progressive de leur nombre jusqu'à nos jours (figure 16). Il est probable que le début de l'Holocène ait été une période moins favorable à la propagation des feux que ne l'ont été les 5000 dernières années, ce qui peut expliquer le petit nombre de charbons datés avant cette période. L'augmentation de l'abondance des charbons dans les sols forestiers à partir de 5000 ans AA a aussi été observée dans les sols des sapinières d'altitude (de Lafontaine et Payette 2011) et dans les pessières à épinette blanche (de Lafontaine et Payette 2012) des Montagnes Blanches et des monts Otish situés à 150 km au nord de la région d'étude. On observe le phénomène inverse dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc où les feux semblent avoir été moins fréquents après 5000 ans AA (Couillard et al. 2013, de Lafontaine et Payette 2011). Par contre, la tendance à l'augmentation graduelle du nombre de charbons au cours du temps à partir de 5000 ans AA pourrait en partie s'expliquer par la dynamique des charbons de surface. La diminution constante de l'abondance des charbons dans le compartiment de surface peut être attribuable à leur dégradation naturelle au cours du temps et au passage de feux successifs pouvant les consumer de nouveau et réduire leur masse (Payette et al. 2012). La distribution exponentielle négative du nombre de charbons en fonction du temps implique qu'il existe un apport constant de charbons dans le sol lié à l'activité des feux relativement stable. Toutefois,

on peut affirmer que les feux ont toujours été présents dans la région et qu'ils sont survenus de façon régulière et continue depuis au moins les 5000 dernières années.

Le grand nombre de stations d'échantillonnage dans la région permet d'apprécier la taille des feux qui sont survenus durant l'Holocène. Le regroupement de tous les événements de feux à l'échelle régionale montre que plusieurs feux survenus au cours des 5000 dernières années ont été détectés dans plus d'une station. On peut en conclure que la majorité des feux étaient de taille modeste ($< 100 \text{ km}^2$), mais que les feux de grande taille ($> 300 \text{ km}^2$), comme ceux de la décennie 1910 et 2000, survenaient assez fréquemment. Malgré qu'ils soient moins nombreux, les feux de grande taille représentent la majorité des superficies incendiées et sont ainsi la cause de la structure d'âge et de la configuration des paysages de la région.

Le régime des feux varie selon les différents écosystèmes qui sont répartis le long de la toposéquence. Les secteurs de basse altitude dominés par le pin gris et l'épinette noire ont été soumis à une fréquence des feux plus élevée que les secteurs des collines dominés par l'épinette noire, le sapin baumier et le bouleau à papier. La dynamique forestière qui caractérise les types de peuplements de la région peut être confirmée par l'histoire des feux à long terme et la composition botanique des charbons.

Types de peuplements associés au pin gris

Les types de peuplements associés au pin gris figurent parmi les stations qui ont enregistré le plus grand nombre de feux au cours de l'Holocène. Le passage répété des feux dans la pinède et les pessières à pin gris assure le maintien de ces espèces bien adaptées aux feux depuis au moins 2500 ans. La composition botanique des charbons, qui comprennent les mêmes espèces que celles des peuplements actuels, et le court intervalle de retour moyen de feux, inférieur à 200 ans au cours des 1000 dernières années, laissent croire que les forêts étudiées évoluent suivant une dynamique de récurrence, consistant en la perpétuation, sous

un régime de feu continu, du même type de peuplement que celui qui a brûlé précédemment. Ces résultats n'appuient donc pas l'hypothèse de l'existence d'une dynamique de succession, commençant par l'installation du pin gris après un feu suivi par l'établissement graduel de l'épinette noire, le stade final de la succession étant une forêt d'épinette noire à l'équilibre.

Un petit nombre de feux a été enregistré à l'aide des charbons de bois dans la pinède. Douze feux ont été détectés lors de l'échantillonnage, soit huit au cours des 1000 dernières années et seulement quatre auparavant. Des travaux réalisés dans d'autres pinèdes (Payette et al. 2012) révèlent que les feux sont particulièrement fréquents dans ces écosystèmes (intervalle de retour moyen de feux d'environ 100 ans). Il est donc raisonnable de penser que plusieurs feux n'aient pas été détectés par notre échantillonnage. Ce nombre est probablement supérieur aux 15 feux théoriques déterminés par les courbes d'accumulation. On attribue cette situation à la dégradation rapide des charbons dans cet écosystème. La faible épaisseur de la matière organique et le court temps de séjour des charbons à la surface du sol, inférieur à 300 ans, permettent d'avancer que les charbons produits lors d'un feu auraient été rapidement éliminés par les feux successifs rendant difficile la reconstitution complète de l'histoire des feux de la station. Basé sur ce constat, on peut affirmer que cette station est probablement celle ayant subi le plus grand nombre de feux dans la région.

Le régime des feux permet au pin gris et à l'épinette noire de cohabiter et de former des peuplements mélangés capables de se perpétuer. L'intervalle de retour moyen des feux inférieur à 200 ans est suffisamment court pour assurer le maintien du pin gris, sans pour autant être défavorable à l'épinette noire, qui atteint sa maturité sexuelle plus tardivement. D'après l'assemblage botanique des charbons de bois, la présence du pin gris semble plus marquée depuis 2500 ans. Plus d'une cinquantaine de charbons de cette espèce ont été datés au cours de cette période, comparativement à un seul auparavant. Les charbons antérieurs à cette période sont

principalement composés d'épinette et, dans une moindre proportion, de bouleau et de sapin baumier. Les diagrammes polliniques montrent une légère augmentation des concentrations polliniques de pin gris depuis 3000 ans (TB2) et 400 ans (TB3), laissant croire à l'expansion de l'espèce au cours de cette période. Toutefois, comme en témoignent les faibles concentrations polliniques de l'espèce, cette progression est probablement modeste et limitée à certaines stations à la marge des massifs de pin gris qui occupent les complexes fluvioglaciaires. Il est donc possible que certaines pessières à pin gris aient été formées au cours de cette période.

Types de peuplements associés à l'épinette noire

La fréquence à long terme des feux détectés dans les pessières est très variable. La station EN1 présente une fréquence de feu élevée comparable à celle des stations à pin gris, tandis que deux fois moins de feux ont été détectés dans les autres stations (EN2, ENP1 et ENP2). On attribue cette variabilité à la capacité de cette espèce à occuper différents milieux. Les pessières situées à proximité des grands complexes fluvioglaciaires qui sont occupés par les peuplements de pin gris sont soumises à une fréquence des feux élevée (Im de 100 ans), alors que celles qui occupent les versants de collines localisés en altitude sont caractérisées par une plus faible fréquence de feu (Im > 200 ans). L'épinette noire possède une grande amplitude écologique lui permettant à la fois de coloniser rapidement le parterre forestier suite au passage d'un feu, grâce à la réserve de graines que renferment ses cônes semi-sérotineux (Viereck 1983), et d'assurer sa présence en se multipliant par marcottage dans les peuplements qui n'ont pas brûlé depuis longtemps (LeGoff et Sirois 2004).

La dynamique des pessières établies sur versants de collines est difficile à évaluer à partir de nos données. Néanmoins, en raison du long intervalle de temps entre les feux et de la présence sporadique du sapin baumier dans les peuplements actuels et dans le répertoire des

charbons, qui donne à penser que l'espèce a toujours cohabité avec l'épinette noire depuis l'Holocène moyen, il est possible qu'une dynamique de succession ait opéré sur ces stations. La dynamique de succession serait alors caractérisée par l'établissement d'une cohorte d'épinette noire après feu suivi d'une augmentation graduelle de l'abondance du sapin baumier. Dans le domaine bioclimatique de la pessière à mousses, le sapin baumier a été décrit comme une espèce pouvant succéder à l'épinette noire si le temps écoulé entre deux feux était suffisamment long, généralement supérieur à 200 ans (Dix et Swan 1971, Carleton et Maycock 1978). Il est donc probable que la succession ait opéré dans ces écosystèmes lors des périodes de temps exemptes de feu qui ont marqué sporadiquement ces stations au cours l'Holocène. Sous ce type de dynamique, le sapin baumier se maintiendrait dans le paysage en colonisant les rares peuplements âgés de la région qui ont échappé aux feux. Toutefois, nos données ne peuvent pas démontrer clairement l'existence d'une telle dynamique.

Types de peuplements associés au sapin baumier et au bouleau à papier

Les types de peuplements associés au sapin baumier et au bouleau à papier sont soumis à un régime de feu comparable à celui caractérisant les pessières. Les feux ont été relativement soutenus dans la plupart des stations d'échantillonnage au cours des cinq derniers millénaires avec un intervalle de feu moyen estimé variant entre 260 et 500 ans. La présence du sapin baumier, de l'épinette et du bouleau dans l'assemblage botanique des charbons témoignerait de la présence sur ces stations de forêts formées de ces espèces depuis ce temps. L'abondance de ces différentes espèces a sans doute fluctué selon le temps écoulé depuis le dernier feu, comme le montre l'état actuel des peuplements. La structure et l'âge des sapinières et des bétulaies laissent croire que la croissance de ces forêts aurait suivi un patron successional qui aurait commencé par l'installation du bouleau à papier après un feu puis aurait été suivi par l'établissement graduel du sapin baumier. Les

deux bétulaies sont issues de feux survenus en 1919, alors que les sapinières à bouleau à papier proviennent de feux plus anciens survenus vers 1715, 1810 et 1815. Les nombreux bouleaux à papier morts dans les sapinières (SBBP2 et SBPB3) témoignent de la plus grande abondance de l'espèce dans le passé. Une dynamique après feu similaire a été observée dans les sapinières de la Réserve faunique des Laurentides (Couillard et al. 2012).

Le sapin baumier arrive à se maintenir au cours du temps dans les sapinières et les bétulaies échantillonnées, malgré des épisodes de feux rapprochés, parfois moins de 100 ans. L'espèce suffisamment abondante et bien répartie dans la région a permis d'assurer la colonisation de sites récemment incendiés initialement dominés par le bouleau à papier. Néanmoins, il est probable que certaines populations de sapins soient parvenues à se régénérer immédiatement à la suite d'un feu, comme en témoignent les stations SBBP1 et SBEN. La structure interne et la démographie des quelques tiges de sapin baumier qui ont été échantillonnées expliqueraient la formation de sapinières peu de temps après feu. La proximité de semenciers autour de la zone incendiée peut faciliter la formation d'une sapinière après feu (Asselin et al. 2001). Toutefois, en raison du petit nombre d'arbres datés, il n'est pas possible d'évaluer l'importance numérique du sapin baumier dans la cohorte après feu. La dynamique de récurrence après feu dans les sapinières est sans doute peu répandue. Elle est probablement limitée aux feux de petite taille ou à la marge des grands feux qui bordent les sapinières. Même si on ne peut en être certain, l'établissement du sapin baumier après feu a probablement assuré le maintien de l'espèce dans la région malgré l'activité de feux fréquents au cours de l'Holocène.

Le passage fréquent des feux permet également d'assurer le renouvellement de certaines bétulaies. Le bouleau à papier est une espèce brévivive, dépassant rarement l'âge de 200 ans, incapable d'assurer sa régénération sous couvert forestier. Il se maintient après feu en produisant des rejets de souche, formant des peuplements

composés de bouquets. La station BP1, qui présente ce type de structure serait un indice que le peuplement actuel proviendrait d'un feu survenu en 1919, une bétulaie elle-même mise en place lors du feu allumé au début du 19^e siècle. Ce type de dynamique survient lorsque l'intervalle de temps entre les feux est court (< 150 ans). L'intervalle de temps entre les feux est généralement supérieur à 250 ans et la présence du sapin baumier et de l'épinette dans le répertoire des charbons échantillonnés des bétulaies laissent supposer que ces dernières auraient évolué la plupart du temps vers des peuplements dominés par les conifères.

La dynamique de récurrence, qui implique des feux fréquents de grande superficie, semble être la principale dynamique écologique des paysages forestiers de la région. La succession écologique semble être un phénomène rare dans les forêts du domaine bioclimatique de la pessière à mousses, comme dans plusieurs autres régions de la forêt boréale où les feux sont fréquents (Dix et Swan 1971, Heinselman 1973, Carleton et Maycock 1978, Cogbill 1985, Frelich et Reich 1995, Payette et al. 2012). Cela signifie que le temps écoulé depuis le dernier feu ne constitue pas un facteur important pour expliquer la composition botanique d'un peuplement sauf dans le cas des écosystèmes dominés par le bouleau à papier et le sapin baumier, qui sont peu abondants dans la région. Les espèces sont plutôt distribuées dans le paysage selon leur adaptation à un régime de feu particulier qui varie en fonction des facteurs physiographiques.

6. Conclusion

Les connaissances acquises dans ce projet permettent de mieux cerner la variabilité écologique des paysages au cours des derniers millénaires et d'utiliser ces informations dans le contexte de la mise en place de l'aménagement écosystémique. Il ressort les principaux points suivants :

- Les paysages de la pessière à mousses au nord du lac Saint-Jean sont en équilibre avec le régime de feu, qui est soutenu dans la région depuis au moins les 5000 dernières années. La

fréquence des feux dans la région a permis d'assurer de manière continue la régénération des forêts. L'état d'équilibre de ces paysages contraste avec la portion nord de la forêt boréale, dans le domaine bioclimatique de la pessière à lichens, où la succession écologique ne conduit pas nécessairement au renouvellement de communautés végétales similaires.

- L'analyse des charbons de bois a mis en évidence le caractère variable de la fréquence des feux selon les différents types de peuplements. Les secteurs de basse altitude, dominés par des forêts de pin gris et d'épinette noire, se caractérisent par un intervalle de retour moyen de feu inférieur à 200 ans. À l'inverse, les secteurs de collines, où l'on trouve les espèces moins bien adaptées aux feux, comme le sapin baumier, présentent un intervalle de retour moyen de feu d'environ 300 ans.
- La fréquence relativement modérée des feux dans la majeure partie de la région d'étude se traduit essentiellement par une dynamique de récurrence qui favorise les espèces pouvant s'établir rapidement dans les zones incendiées. Ce processus écologique fait en sorte que la composition forestière est demeurée relativement stable dans la région depuis la mise en place des premières forêts

qui se sont établies rapidement après la déglaciation.

- Les sapinières et les bétulaies qui occupent certains versants de collines sont soumises à une dynamique de succession. L'incapacité du bouleau à papier à assurer sa régénération sous couvert forestier et sa faible longévité peuvent expliquer que l'on observe ce type de dynamique. Toutefois, nous n'avons pas été en mesure de démontrer clairement qu'une dynamique de succession, caractérisée par l'établissement rapide d'une cohorte d'épinette noire après feu suivi d'une augmentation graduelle de l'abondance du sapin baumier avec le temps, s'opère dans les pessières établies sur versants de collines, et ce, malgré que la fréquence de feu soit comparable.
- Malgré l'occurrence des feux dans la région, un peu plus du quart de la superficie forestière n'a pas été incendiée depuis plus de 150 ans. Elle est formée, en proportion équivalente, de petits îlots forestiers bien répartis dans l'ensemble de la région et quelques massifs forestiers qui occupent les secteurs d'altitude.
- Notre échantillonnage a également permis de souligner l'existence de quelques rares forêts qui n'ont pas été incendiées depuis plus de 300 ans. Elles sont de petites dimensions et confinées à certains refuges topographiques défavorables au passage des feux.

7. Bibliographie

- ASSELIN, H., M.-J. FORTIN et Y. BERGERON, 2001. Spatial distribution of late-successional coniferous species regeneration following disturbance in southwestern Québec boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 140 : 29-37.
- CARLETON, T.J., et P.F. MAYCOCK, 1978. Dynamics of the boreal forest south of James Bay. *Canadian Journal of Botany*, 56 : 1157-1173.
- COGBILL, C.V., 1985. Dynamics of the boreal forests of the Laurentian Highlands, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 15 : 252-261.
- COUILLARD, P.-L., S. PAYETTE et P. GRONDIN, 2012. Recent impact of fire on high-altitude balsam fir forests in south-central Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 42 : 1289-1305.
- COUILLARD, P.-L., S. PAYETTE et P. GRONDIN, 2013. Long-term impact of fire on high-altitude balsam fir (*Abies balsamea*) forests in south-central Quebec deduced from soil charcoal. *Canadian Journal of Forest Research*, 42: 188-199.
- DE LAFONTAINE, G., et S. PAYETTE, 2011. Shifting zonal patterns of the southern boreal forest in eastern Canada associated with changing fire regime during the Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 30 : 867–875.
- DE LAFONTAINE, G., et S. PAYETTE, 2012. Long-term fire and forest history of subalpine balsam fir (*Abies balsamea*) and white spruce (*Picea glauca*) stands in eastern Canada inferred from soil charcoal analysis. *The Holocene*, 22 : 191-201.
- DIX, R.L., et J.M.A. SWAN, 1971. The roles of disturbance and succession in upland forest at Candle Lake, Saskatchewan. *Canadian Journal of Botany*, 49 : 657-676.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 2012. Climat du Canada. [en ligne] : http://climate.weather.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_e.html?stnID=5893&autofwd=1
- FRÉGEAU, M., 2013. Dynamique de la pessière à mousses au Nord du Lac-Saint-Jean (Québec). Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec. 72 p.
- FRÉGEAU, M., S. PAYETTE et P. GRONDIN, 2015. Fire history of the central boreal forest in eastern North America reveals stability since the mid-Holocene. *The Holocene*, 25 : 1912-1922.
- FRELICH, L.E., et P. B. REICH, 1995. Spatial patterns and succession in a Minnesota southern-boreal forest. *Ecological Monographs*, 65 : 325-346.
- GROUPE DE TRAVAIL SUR LA CLASSIFICATION DES SOLS, 2002. Le système canadien de classification des sols, 3^{ième} édition. Direction générale de la recherche, Ministère de l'Agriculture et de l'Agro-alimentaire du Canada, Publication 1646, Ottawa, 196 p.
- HEINSELMAN, M.L., 1973. Fire in the virgin forests of the Boundary Waters Canoe Area, Minnesota. *Quaternary Research*, 3 : 329-382.
- LEGENDRE, P., et E. GALLAGHER, 2001. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia*, 129 : 271-280.
- LEGENDRE, P., et L. LEGENDRE, 2012. *Numerical ecology*, Elsevier, Amsterdam, NL. 190 p.
- LEGOFF, H., et L. SIROIS, 2004. Black spruce and jack pine dynamics simulated under varying fire cycles in the northern boreal forest of Quebec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 34 : 2399-2409.

- MCKEAGUE, J.A., 1978. Manual of soil sampling and methods of analysis, Second edition. Canadian Soil Survey Committee, Canadian Society of Soil Science, Ottawa, Ontario, 250 p.
- MUELLER-DOMBOIS, D., et H. ELLENBERG, 1974. Aims and methods of vegetation ecology. John Wiley & Sons, New York, 547 p.
- OCCHIETTI, S., M. PARENT, P. LAJEUNESSE, F. ROBERT et É. GOVARE, 2011. Late Pleistocene-early Holocene decay of the Laurentide ice sheet in Quebec-Labrador. p. 601-630, dans EHLERS, J., P.L. GIBBARD et P.D. HUGHES (éditeurs). *Developments in Quaternary Science*, 15, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- OHLSON, M., et E. TRYTERUD, 2000. Interpretation of the charcoal record in forest soils: forest fires and their production and deposition of macroscopic charcoal. *The Holocene*, 10 : 519-525.
- PAYETTE, S., 2010. Dendroécologie des forêts. p. 351-413, dans PAYETTE, S. et L. FILION (éditeurs). *La dendroécologie: principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec, Québec.
- PAYETTE, S., A. DELWAIDE, A. SCHAFFHAUSER et G. MAGNAN, 2012. Calculating long-term fire frequency at the stand scale from charcoal data. *Ecosphere*, 3 : art59.
- R DEVELOPPEMENT CORE TEAM, 2011. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- RÉGNIERE, J., et R. SAINT-AMANT (2008). *BioSIM 9 – Manuel de l'utilisateur*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides, 74 p.
- REIMER P.J., E. BRAD, A. BAYLISS, J.W. BECK et al., 2013. Intcal13 and marine13 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 55 : 1869-1887.
- SOBERÓN, J., et J. LLORENTE, 1993. The use of species accumulation functions for the prediction of species richness. *Conservation Biology*, 7 : 480-488.
- SOLANKI, S.K., I.G. USOSKIN, B. KROMER, M. SCHÜSSLER et J. BEER, 2004. Unusual activity of the sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature*, 431 : 1084-1087.
- STUIVER, M., P.J. REIMER et R.W. REIMER, 2013. CALIB 7.02. [en ligne] <http://www.calib.org>.
- TALON, B., S. PAYETTE, L. FILION, et A. DELWAIDE, 2005. Reconstruction of the long-term fire history of an old-growth deciduous forest in southern Quebec, Canada, from charred wood in mineral soils. *Quaternary Research*, 64 : 36-43.
- VIERECK, L., 1983. The effects of fire in black spruce ecosystems of Alaska and northern Canada. p. 201-220, dans WEIN, R.W. et D.A. MACLEAN (éditeurs.) *The role of fire in Northern Circumpolar Ecosystems*. John Wiley & Sons New York.

Annexe 1. Typologie forestière

Figure A.1 : Diagramme de triple projection de l'analyse de redondance caractérisant les ~28 000 peuplements selon la matrice de végétation Y et la matrice des variables explicatives X. L'analyse de groupement k-Means a permis de diviser les peuplements en huit groupes (points de couleur). Les espèces forestières (encadrés noirs) représentées sont l'épinette noire (EPN), le pin gris (PIG), le sapin baumier (SAB) et le bouleau à papier (BOP). Les variables explicatives (points noirs) sont l'altitude, la pente, le type de dépôt (glaciaire épais, DE_GLA; glaciaire mince, DE_MIN; fluvioglaciaire, DE_FLU; organique, DE_ORG), la classe de drainage (mésique, DR_MES; subhydrique, DR_SUB; hydrique, DR_HYD), le nombre de degrés-jours (DJ) et la température moyenne annuelle (TMA).

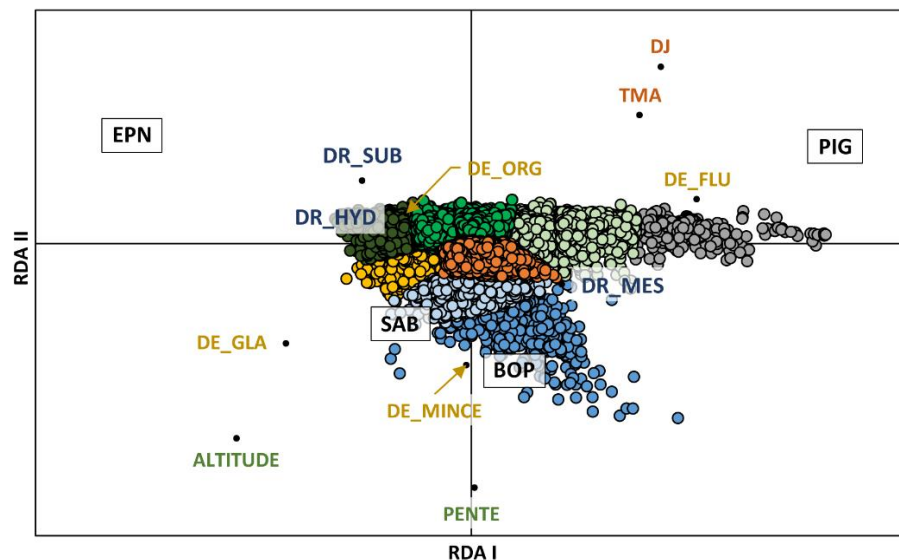


Tableau A.1 Variables explicatives

Groupe	Type forestier	Superficie		Végétation				Milieu physique										Climat	
				Espèces				Relief		Dépôts				Drainage			DJ	TMA	
				EPN	PIG	SAB	BOP			Alt.	Pen.	Gla.	Min.	Flu.	Org.	Més.			Sub.
		km²	%					m	%			%		%	%	%	-	°C	
PIG	Pinède grise	46.2	2.5	38.0	61.5	0.1	0.2	414.9	4.0	0.0	0.0	94.6	0.0	94.9	4.7	0.0	1148	-0.51	
	Pessière à pin gris	415.6	22.1	69.6	28.7	0.6	0.6	435.6	6.0	48.0	8.0	49.2	1.9	88.2	8.7	2.4	1139	-0.55	
EPN	Pessière noire (plat/ondulé)	600.0	32.0	89.8	8.2	1.0	0.5	465.3	5.2	82.6	3.9	8.6	8.0	71.0	19.2	9.0	1124	-0.63	
	Pessière noire (pente)	187.2	10.0	85.2	3.4	3.6	6.8	489.5	13.5	93.9	46.3	3.1	0.2	97.0	2.2	0.3	1118	-0.63	
	Pessière noire (organique)	201.7	10.7	95.3	0.9	2.7	0.6	489.7	5.2	80.4	5.8	0.6	17.9	40.7	33.3	24.1	1108	-0.75	
SAB/ BOP	Sapinière à épinette noire	217.6	11.6	82.4	0.5	12.0	4.4	520.1	12.2	96.9	44.3	0.2	1.3	88.9	8.8	1.8	1094	-0.80	
	Sapinière à bouleau blanc	163.8	8.7	67.8	0.4	15.3	15.5	541.6	19.3	96.0	71.5	0.2	0.2	97.7	1.1	0.2	1085	-0.83	
	Bétulaie	45.4	2.4	48.4	0.0	13.9	37.0	553.6	29.5	92.9	79.9	0.0	0.0	98.0	0.0	0.1	1055	-1.00	

Annexe 2. Courbes d'accumulation

L'échantillonnage aléatoire de charbons n'assure pas la détection de tous les feux survenus dans une station donnée. On a utilisé des courbes d'accumulation afin de savoir si le nombre de feux détectés correspondait au nombre de feux réels survenus dans chaque station (de Lafontaine et Payette 2012). Ce type d'analyse permet d'évaluer l'effort d'échantillonnage visant à représenter adéquatement une population donnée (Soberón et Llorente 1993). La courbe d'accumulation met en relation le nombre de feux détectés en fonction d'un nombre de charbons datés. Lorsque la courbe forme une asymptote, cela signifie que la datation de nouveaux charbons ne permet pas de recenser de nouveaux feux et que la plupart des feux ont été effectivement détectés. On a calculé la courbe d'accumulation de chaque station en utilisant la fonction *accumresult()* selon la méthode aléatoire de l'extension *BiodiversityR* du logiciel R (R Development Core Team 2011). Cette fonction trace 100 courbes d'accumulation en ré-échantillonnant aléatoirement les dates de charbon d'une station donnée. Une courbe d'accumulation moyenne est alors tracée à partir de ces 100 courbes (Frégeau 2013).

Un indicateur du nombre de feux réels a été calculé à partir des courbes d'accumulation moyenne de chaque station. On a calculé un indice en effectuant une régression non linéaire du nombre de feux moyens détectés en fonction du nombre de charbons datés à l'aide de l'équation suivante :

$$F_{(n)} = F_{\max}(1 - e^{-Kn}) \quad [1]$$

où $F(n)$ correspond au nombre de feux détectés, n au nombre de charbons datés, K à la constante contrôlant la forme de la courbe et $F_{\max}$ à l'indice du nombre de feux. L'indice $F_{\max}$ et la constante K ont été calculés avec la fonction *nls()* du logiciel R (R Development Core Team 2011). L'indice $F_{\max}$ correspond au facteur qui contrôle l'aplanissement de la courbe exponentielle négative considéré ici comme un estimateur du nombre réel de feux (Soberón et Llorente 1993, de Lafontaine et Payette 2011, Payette et al. 2012). L'indice $F_{\max}$ a été ramené au nombre entier de manière à ce que l'on obtienne un nombre de feux entier.

Figure A.2 : Nombre de feux cumulés en fonction du temps (A) et nombre de charbons datés dans chacune des stations depuis les 1000 dernières années (B) ou depuis le premier feu détecté (C). Les courbes en B et C sont la moyenne de 100 réitérations où $F(n) = F_{\max}(1 - e^{-kn})$ où $F(n)$ correspond au nombre de feux détectés, n au nombre de charbons datés, $F_{\max}$ le nombre de réels estimés (asymptote), et k la constante.

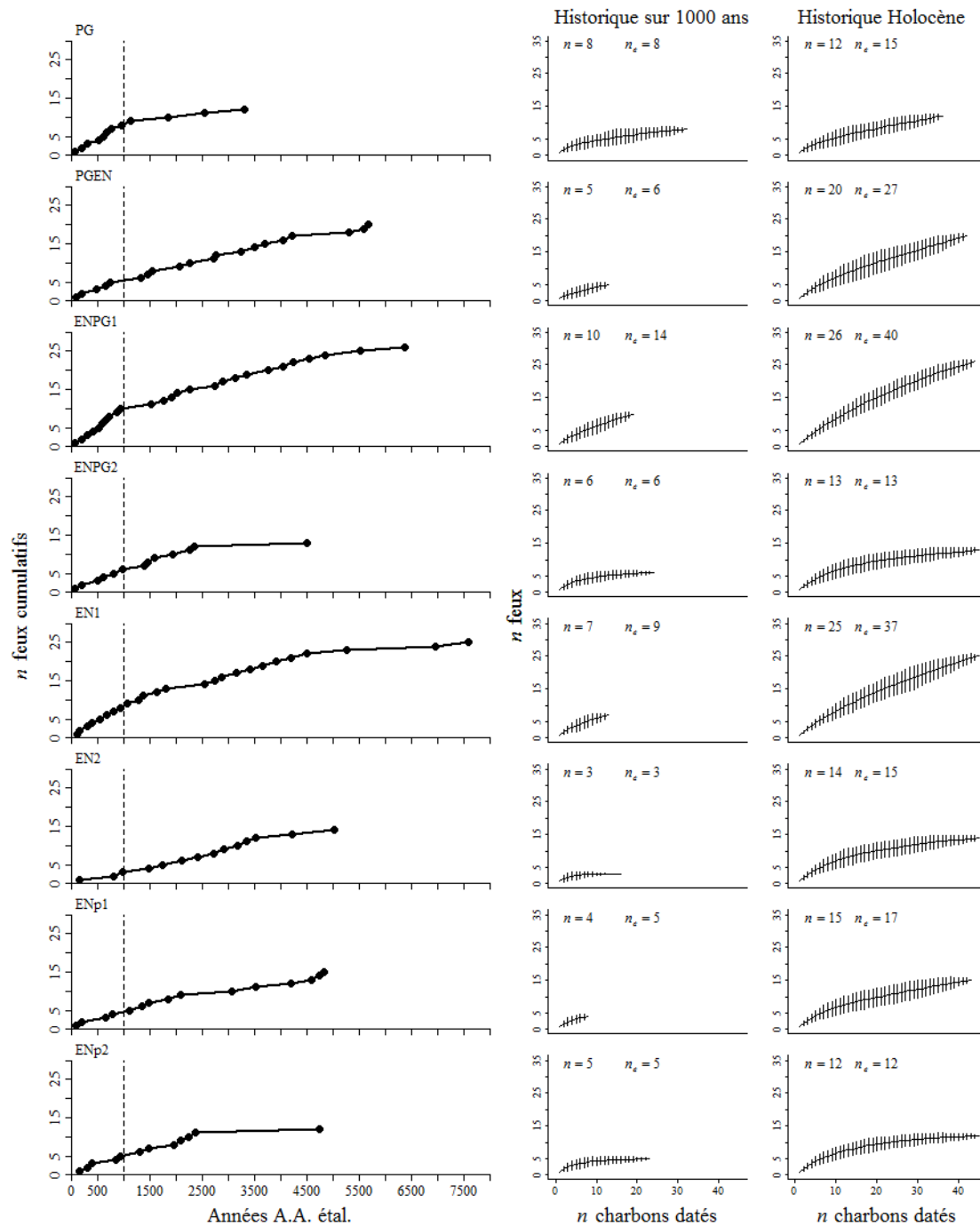
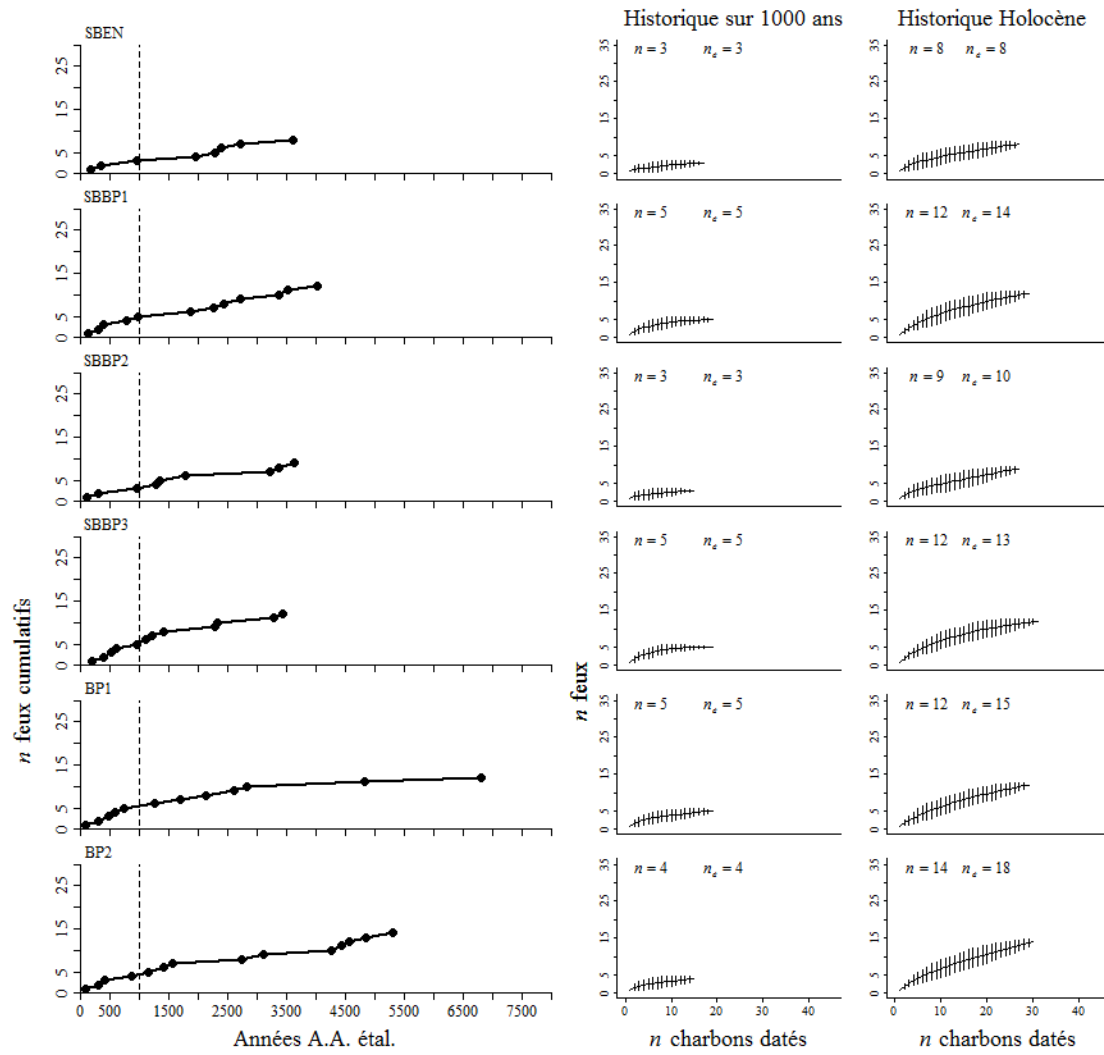


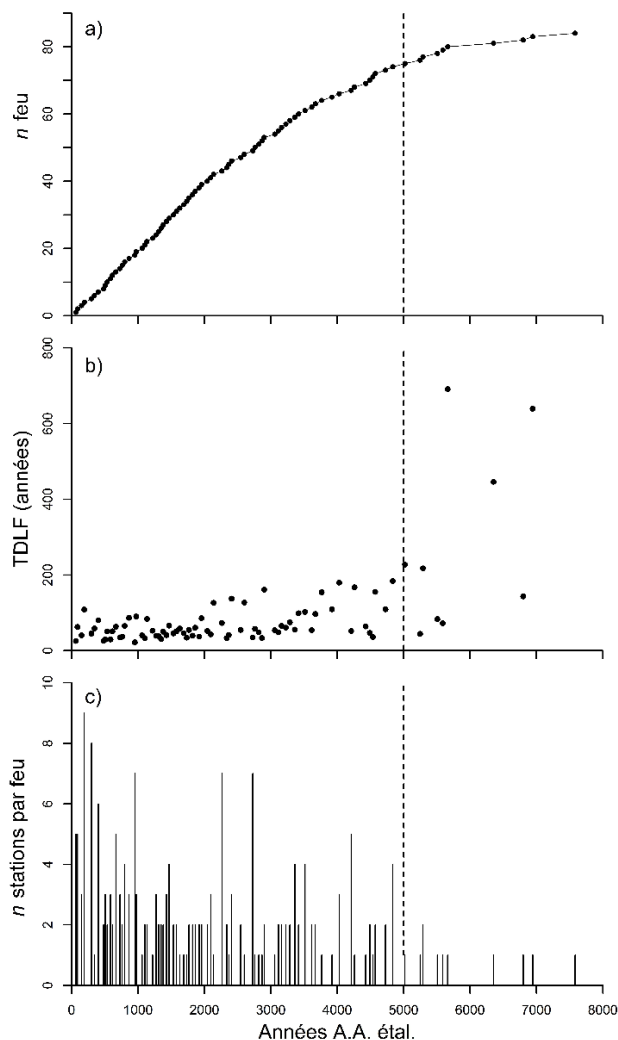
Figure A.2 (suite)



Annexe 3. Étendue des feux dans l'ensemble de la région au cours de l'Holocène

Afin d'estimer l'étendue des feux dans l'ensemble de la région au cours de l'Holocène, on a regroupé les dates des feux de toutes les stations à l'aide d'une classification hiérarchique de type « saut maximal », en utilisant l'extension du logiciel R *hclust* et la méthode « complete » (Legendre et Legendre 2012). Le dendrogramme créé par cette fonction a été coupé au seuil de 45 ans. Ainsi, les dates de feu à l'intérieur d'un groupe donné ne peuvent pas avoir plus de 45 ans de différence d'âge avec les autres membres du groupe. L'utilisation du seuil de 45 ans a permis de considérer les incertitudes liées à la datation des feux et d'éviter ainsi que deux feux consécutifs d'une même station soient regroupés. Un intervalle moyen des feux régional (IMFR), correspondant au temps moyen écoulé entre deux événements de feu dans la région, a été calculé. L'IMFR ne peut pas être comparé aux autres types de mesures du régime des feux actuel, comme la période de rotation de feux, étant donné que le nombre de stations analysées est trop petit par rapport à la superficie de la région étudiée. Par contre, il s'agit jusqu'à présent de la meilleure mesure possible d'évaluation de la fréquence des feux à l'échelle régionale et à celle de l'Holocène.

Figure A.3 : Histoire régionale des feux basée sur la classification hiérarchique des dates de feux de toutes les stations. (a) Nombre cumulé d'événements de feu en fonction du temps et nombre d'événements de feu depuis 5000 ans. (b) Temps écoulé depuis le dernier feu (TEDF) en fonction du temps et de l'intervalle moyen des feux à l'échelle de la région (IMFR) au cours des 5000 dernières années. (c) Nombre de stations qui ont enregistré chacun des feux. La période de référence du calcul de l'IMFR est celle couvrant les 5000 dernières années A.A. (ligne pointillée).





Forêts, Faune
et Parcs

Québec

