

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

DYNAMIQUE HOLOCÈNE DE L'ÉRABLE À SUCRE
(*ACER SACCHARUM* MARSH.) DANS L'OUEST DU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

EXTENSIONNÉ DE

DE L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PAR

JORDAN PAILLARD

MAI 2018

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs de maîtrise, Olivier Blarquez et Yves Bergeron pour m'avoir confié un projet de recherche aussi passionnant, mais également pour les conseils et les connaissances qu'ils m'ont prodigués tout au long de mon cheminement. Je remercie également toutes les personnes qui m'ont aidé durant les missions de terrains et avec qui j'ai pu partager les piqures de maringouin : Léa Peter, Andy Hennebelle, Syrah Blarquez, Pierre Grondin et Raynald Julien. Je remercie également les collègues du laboratoire de paléoécologie et du laboratoire de biogéographie pour les discussions enrichissantes. Ainsi je remercie tout particulièrement Évrard Kouadio, Julie Aleman, Julien Arsenault, Julie Talbot et Jules Regard. Je voudrais également remercier les partenaires financiers de ce projet, soit le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), le Fond de Recherche du Québec – Nature et Technologies (FRQNT) et l'entreprise RYAM Gestion forestière. Aussi, je remercie tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin dans la préparation et la rédaction de ce projet.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	xv
LISTE DES TABLEAUX.....	xvii
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES.....	xix
LISTE DES ANNEXES.....	xxi
RÉSUMÉ	xv
CHAPITRE I INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE II MATÉRIELS ET MÉTHODES	7
2.1 Région d'étude	7
2.2 Sélection des sites	10
2.3 Échantillonnage des sites	11
2.4 Analyses de laboratoire	11
2.4.1 Modèle d'âge-profondeur	11
2.4.2 Analyses palynologiques et reconstitution de la végétation	13
2.4.3 Analyses des charbons de bois.....	16
2.4.4 Pertes au feu	17
2.5 Analyses statistiques	17
2.6 Données climatiques	18
CHAPITRE III RÉSULTATS	19
3.1 Sédimentation et chronologie.....	19
3.2 Généralités sur l'historique des feux.....	21
3.2.1 Lac Fur	21
3.2.2 Lac Chasseur.....	21
3.2.3 Lac Labelle.....	21
3.2.4 Synthèse des sites.....	22
3.3 Histoire holocène de la végétation et des feux.....	22
3.3.1 Lac Fur	24

3.3.2 Lac Chasseur.....	27
3.3.3 Lac Labelle.....	30
CHAPITRE IV DISCUSSION	33
4.1 Histoire holocène de la végétation.....	33
4.1.1 Déglaciation et retrait des lacs proglaciaires.....	34
4.1.2 Phase de toundra et d'afforestation.....	35
4.1.3 Fermeture du couvert forestier.....	37
4.1.4 Formation d'une forêt mixte.....	38
4.2 Histoire holocène des feux.....	39
4.3 Comparaison des résultats provenant des sédiments lacustres et de la pédoanthracologie, cas du lac Chasseur	43
CHAPITRE V CONCLUSION GÉNÉRALE	45
ANNEXES	49
BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE	69

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 Cartographie de la région d'étude	7
2.2 Cartographie des sites à l'étude et types écologiques à proximité.....	8
3.1 Modèles âges-profondeur des sites à l'étude	20
3.2 Boîte à moustache de l'occurrence des feux/1000 ans selon le f_{surf} et le $f_{\#}$	23
3.3 Diagramme pollinique simplifié du lac Fur	24
3.4 Accumulation de charbons de bois macroscopiques ($\geq 150\mu\text{m}$) et historique des feux du lac Fur	25
3.5 Diagramme pollinique simplifié du lac Chasseur	27
3.6 Accumulation de charbons de bois macroscopiques ($\geq 150\mu\text{m}$) et historique des feux du lac Chasseur	28
3.7 Diagramme pollinique simplifié du lac Labelle.....	30
3.8 Accumulation de charbons de bois macroscopiques ($\geq 150\mu\text{m}$) et historique des feux du lac Labelle.....	31
4.1 Principales phases de végétation des sites de la région d'étude.....	34
4.2 Évolution de l'influx pollinique d' <i>Acer saccharum</i> , de la fréquence des feux et du climat.....	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Localisation, caractéristiques et paramètres environnementaux des sites	10
2.2 Datations ^{210}Pb et ^{14}C utilisées pour la création des modèles âge-profondeur. BP = <i>Before present</i> ou avant 1950	13
3.1 Généralités sur l'historique des feux	23

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

%MO :	Pourcentage de matière organique
^{14}C :	Isotope de carbone
^{210}Pb :	Isotope de plomb
^{210}Po :	Isotope de polonium
AD :	Anno Domini (après Jésus-Christ)
Age cal. BP :	Age calibrés <i>Before Present</i> (<i>Before Present</i> = avant 1950)
AMS :	<i>Accelerator mass spectrometry</i> (datation carbone 14)
CCSM3 :	<i>The Community Climate System Model 3</i>
CHAR :	<i>Charcoal accumulation rate</i>
CHAR _# :	<i>Charcoal accumulation rate</i> issus du nombre de charbons
CHAR _{surf.} :	<i>Charcoal accumulation rate</i> issus de la surface des charbons
CRS model :	<i>Constant rate of supply model</i>
f _# :	Fréquence des feux (nombre de feux/1000 ans) issus du nombre de charbons
f _{surf.} :	Fréquence des feux (nombre de feux/1000 ans) issus de la surface des charbons
FRI :	<i>Fire return interval</i>
LOWESS :	<i>Locally WEighted Scatterplot Smoothing</i>
MDDELCC :	Ministère du Développement Durable et de la Lutte contre les Changements Climatiques
MFFP :	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs

LISTE DES ANNEXES

Annexe	Page
A. Diagramme pollinique du lac Fur présentant les principaux taxons sans application de seuil de présence locale.....	49
A.1 Suite de l'annexe A	50
B. Diagramme pollinique du lac Chasseur présentant les principaux taxons sans application de seuil de présence locale.....	51
B.1 Suite de l'annexe B	52
C. Diagramme pollinique du lac Labelle présentant les principaux taxons sans application de seuil de présence locale.....	53
C.1 Suite de l'annexe C.....	54
D. Diagramme pollinique simplifié du lac Bastien (Bennett, 1987).....	55
E. Diagramme pollinique simplifié du lac Louis (McAndrews, 1981)	57
F. Diagramme pollinique simplifié du lac Yelle (Richard, 1980).....	59
G. Diagramme pollinique simplifié du lac Clo (Richard, 1980).....	61
H. Matrice de corrélation de spearman du site Fur	63
I. Matrice de corrélation de spearman du site Chasseur.....	65
J. Matrice de corrélation de spearman du site Labelle	67

RÉSUMÉ

Aux abords du lac Labelle, dans la réserve écologique projetée du Ruisseau Clinchamp, se trouve une des érablières les plus isolées de l'aire de répartition actuelle. Relique d'une aire de répartition autrefois plus vaste ou établissement récent ? Aucune étude paléoécologique locale ne permet actuellement de répondre à cette question. En outre, alors que le maintien des érablières dans la forêt tempérée est principalement régi par une dynamique de trouée, un régime de perturbation dominé par les feux de forêt dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc où se trouve l'érablière à l'étude ne semble ni affecter ni expliquer la présence d'érable à sucre. L'objectif de cette étude est donc d'identifier l'origine de l'érablière du lac Labelle ainsi que le régime de feux associé à la présence de l'érable à sucre. Pour répondre à ces deux objectifs, ce projet porte sur trois sites le long d'un transect latitudinal dans la région Abitibi-Témiscamingue, dont un site à 75 km au nord de la limite d'aire de répartition (lac Labelle), un site en limite d'aire de répartition (lac Chasseur) et un site au cœur de l'aire de répartition (lac Fur). Une analyse palynologique et anthracologique des sédiments lacustres de ces trois sites a été utilisée afin de reconstruire l'histoire de la végétation et des feux. Les résultats nous permettent de constater que l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) est présent régionalement depuis au moins 9000 cal. BP dans la partie sud (lac Fur) de la région d'étude et depuis 8000 cal. BP au nord (Lacs Chasseur et Labelle). L'établissement local de l'espèce est cependant attesté qu'à partir de 7800 cal. BP au site Fur, 4000 cal. BP au site Chasseur et 2500 cal. BP au site Labelle. L'analyse des données palynologiques couplées aux analyses anthracologiques ont permis de caractériser la sévérité des feux pour chacun des sites au cours de l'holocène. D'après nos interprétations, l'augmentation de la proportion de feuillues dans la forêt boréale mixte (*Betula* cf. *papyrifera*) à partir de 6000 cal. BP aurait entraînée une baisse de la sévérité des feux et ainsi favorisé l'établissement d'*Acer saccharum*. Une baisse de la fréquence des feux fut néanmoins nécessaire pour permettre l'établissement d'*Acer saccharum* aux sites Chasseur et Labelle.

Mots clés : *Acer saccharum*, Holocène, feux de forêt, forêt boréale mixte, ouest du Québec, Abitibi-Témiscamingue.

CHAPITRE I INTRODUCTION

L'aire de répartition d'une espèce peut être définie comme étant la représentation spatiale de sa niche écologique (Hargreaves et al. 2014). Au sein de cette aire de répartition, cette niche est définie par un ensemble de conditions environnementales, par exemple la température, les précipitations, la photopériode, la compétition interspécifique, le régime de perturbation, favorables au développement de l'espèce et à la formation de populations viables (Gaston, 2009). La marge de l'aire de répartition d'une espèce correspond donc à la limite géographique où une ou plusieurs conditions environnementales ne permettent pas son établissement et son maintien. Des changements dans les conditions environnementales pourront alors donner lieu au cours du temps à des expansions ou à des rétractions de la limite d'aire de répartition menant dans certains cas à l'extinction de l'espèce. Cette dynamique d'expansion et de rétraction permet alors la formation de populations marginales, c'est-à-dire localisées à l'extérieur de l'aire de répartition. Généralement isolées les unes des autres, ces populations marginales peuvent être le résultat de 1) la rétraction d'une aire de répartition autrefois plus vaste ou 2) une expansion plus ou moins récente de l'espèce (Gaston, 2003). Dans les deux cas, ces populations sont la preuve que les conditions climatiques (précipitations, température, photopériode...) sont propices au développement de l'espèce, mais que d'autres variables empêchent l'espèce d'être présente de manière continue à l'échelle du territoire.

Outre les composantes intrinsèques du milieu physique (pente, dépôts de surface, nutriments disponibles...), le régime des perturbations naturelles et plus particulièrement le feu joue un rôle central sur la répartition de nombreuses espèces. Ainsi, dans la forêt boréale, les aires de répartition nordiques d'*Abies balsamea* (L.) Mill. (Ali et al., 2008, de Lafontaine et Payette, 2011), *Thuja occidentalis* L. (Paul, 2011), *Pinus strobus* L. (Bergeron et al., 1997), ou encore *Picea glauca* (Moench)

Voss. (Parisien et Sirois, 2003) seraient principalement limitées par des feux dont la fréquence, l'étendue ou la sévérité dépassent leurs seuils de tolérance. En outre, les feux exacerbent la compétition interspécifique en favorisant les espèces adaptées aux feux de forêt (Bergeron et Dubuc, 1988, Asselin et al., 2003) telles que *Pinus banksiana* Lamb., *Picea mariana* Mill. BSP, *Betula papyrifera* Marsh. ou encore *Populus tremuloides* Michx. Des populations marginales d'*Acer saccharum* présentes actuellement au sein de la forêt boréale mixte indiqueraient également que l'aire de répartition nordique de cette espèce serait limitée par les feux de forêt. Cependant, une meilleure compréhension de cette dynamique n'est possible qu'en considérant l'évolution de ces populations sur une échelle de temps pluriséculaires (holocène, derniers 11 700 ans) qui permet de comprendre la biogéographie ainsi que l'écologie des espèces longévives.

Le réchauffement des températures initié à la fin du Pléistocène et poursuivi durant l'Holocène a résulté au Québec en un retrait des glaces vers 13 500 - 13 200 cal. BP (Ochietti et Richard, 2003, Richard, 2007). Mais ce n'est que vers 9900 cal. BP, au lac Albion en Estrie (Lavoie et Richard, 2000), que la présence des premières érablières est attestée au Québec. Cette première phase d'établissement s'est ensuite poursuivie sur la région des collines Montérégiennes vers 9600 cal. BP au Mont-Saint-Bruno et 9300 cal. BP à Bromont (Muller et Richard, 2001). Les érablières aujourd'hui présentes dans la région du Saguenay se seraient établies vers 8500 cal. BP, alors que les premiers peuplements d'érable se formaient dans le sud du Québec. À cette même période, on constate également un établissement de l'espèce au Témiscamingue (Bennett, 1987). Durant l'optimum climatique holocène, un climat plus chaud et plus humide aurait permis à l'érable à sucre de coloniser des stations au climat plus froid, notamment dans la Baie-des-Chaleurs vers 6850 cal. BP (Jetté et Richard, 1992), dans le massif des Laurentides vers 5700 cal. BP (Labelle et Richard, 1981) et en Haute-Gaspésie vers 5400 cal. BP (Labelle et Richard, 1984). Selon plusieurs études (Richard, 1980;

Blarquez et Aleman, 2015), l'abondance du genre *Acer* ainsi que son aire de répartition a connu très peu de changements depuis 6000 cal. BP.

Cette aire de répartition stable depuis près de 6000 ans devrait changer au cours du prochain siècle en réponse aux changements climatiques. En effet, selon Périé et al. (2014), l'habitat potentiel de l'érable à sucre augmentera de plusieurs centaines de kilomètres au nord à l'horizon 2080. Une vitesse de migration de 4,9 km/an serait alors nécessaire pour suivre les conditions climatiques. Selon Boisvert-Marsh et al. (2014) la vitesse de migration de l'espèce serait de 0,4 km/an, soit une vitesse comparable à la vitesse de migration postglaciaire (Boisvert-Marsh et al. 2014). D'après ces modélisations, un décalage sera observé entre l'aire de répartition réelle et l'aire de répartition optimale. En outre, le suivi du développement de jeunes érables à sucre au nord de l'aire de répartition actuelle permet de constater que cette espèce se développe sans problème dans des conditions climatiques plus froides (Kellman, 2004). Un décalage entre l'aire de répartition réelle et l'aire de répartition optimale est donc déjà présent. Ce décalage pourrait notamment s'expliquer par un régime de perturbation auquel l'érable à sucre n'est pas adapté ou encore par la présence d'une compétition interspécifique (Fisichelli et al., 2013; Gaignic et al., 2014).

Située au cœur de la forêt tempérée nordique et à la marge de la forêt boréale mixte, l'aire de répartition d'*Acer saccharum* se voit affectée par une grande diversité de régime de perturbation. Dans la forêt tempérée, le temps de retour des feux est estimé entre 1400 et 4000 ans (Frelich et Lorimer, 1991). Les espèces qui la composent sont généralement très peu inflammables et présentent une discontinuité verticale du combustible entre le sol et la canopée, empêchant ainsi le développement de feux de couronnes (Girardin et al., 2013; Campbell et Flannigan, 2000; Hély et al., 2001). Ce sont alors principalement les feux de surface qui prédominent. En l'absence de feux ou de chablis catastrophiques, le maintien et le renouvellement des érablières sont donc principalement régis par une dynamique de trouées depuis leur établissement (Pickett et White, 1985). Ce régime de perturbation ponctuel qui se manifeste par la chute

d'arbres morts ou de branches, donne lieu à des trouées d'une superficie $<100 \text{ m}^2$ (Doyon et Sougavinski, 2002; Després et al., 2014) avec un temps de retour compris entre 1 et 10 ans. Les conséquences écologiques de ce type de perturbation sont nombreuses, on remarque notamment une modification de la disponibilité des ressources; de la température, de l'humidité et de la lumière (Runkle, 1985). La fermeture des trouées se fait rapidement par la croissance horizontale des strates supérieures ou par la croissance verticale de la strate inférieure (Runkle, 1982). Il en découle donc une structure d'âge inéquienne.

Dans la forêt boréale, le régime de perturbation est dominé par les feux de forêt. La présence d'espèces fortement inflammables ainsi qu'une continuité verticale du combustible (du sol vers la cime) permet le développement de feux de forte intensité et de grande taille (Stocks et al., 2001; DeGroot et al., 2013). Dans la forêt boréale mixte, où *Acer saccharum* atteint sa limite septentrionale, la dynamique des peuplements forestiers est cependant plus complexe. En effet, plusieurs trajectoires d'évolution, déterminées par de nombreux facteurs biotiques et abiotiques, peuvent être observées (Bergeron et al., 2014). La trajectoire dite "classique" donne lieu à des peuplements forestiers dominés par les feuillus en début de succession puis par les conifères en fin de succession. À l'échelle du paysage, cette dynamique de succession résulte en une mosaïque forestière parfois dominée par les feuillus (*Betula papyrifera* et *Populus tremuloides*) et parfois dominée par les conifères (*Abies balsamea*, *Pinus banksiana*, *Picea mariana*). Une différence de combustibilité entre les feuillus et les conifères donne alors lieu au sein de cette mosaïque à une fragmentation de la combustibilité et donc à une diminution de la probabilité du développement de feux de grande taille (Hély et al., 2010). Cette dynamique particulière permet alors le maintien d'espèces de fin de succession telle que *Abies balsamea* (Ali et al., 2008), *Thuja occidentalis* (Paul et al., 2014), *Picea glauca* (Parisien et Sirois, 2003) et *Pinus strobus* (Bergeron et al., 1997) qui nécessitent la présence de survivants pour recoloniser le milieu. Les feux dans la forêt mixte boréale sont donc généralement de plus petite taille

et de plus faible intensité que dans la forêt boréale pure (Hély et al., 2001; Bergeron et al., 2004).

La présence actuelle de l'érable à sucre dans la forêt boréale mixte et sa présence passée (Talon et al., 2005; Pilon et Payette, 2015; Bilodeau, 1992) dans des environnements davantage affectés par les feux suggèrent une certaine tolérance de l'espèce face à cette perturbation. Son seuil de tolérance aux feux de forêt reste cependant à déterminer. L'érablière de la réserve projetée du Ruisseau Clinchamp (voir Figure 2.1, site du lac Labelle) constitue l'une des populations marginales d'érable à sucre les plus isolées de son aire de répartition. L'absence d'études paléoécologiques locales ne permet pas d'identifier l'origine de ce peuplement ainsi que les processus qui ont permis son maintien depuis son installation. Les études menées dans la région concernant la dynamique des érablières en limite d'aire de répartition nous dirigent vers deux hypothèses opposées. En effet, d'une part les analyses palynologiques menées par Richard (1980) aux lacs Clo et Yelle au sud du lac Abitibi attestent de la présence mineure de l'érable à sucre dans la région depuis 8000 cal. B.P. D'autre part, une étude (Pilon et Payette, 2015) basée sur la pédoanthracologie d'une érablière à Rémigny (Figure 2.1), environ 50 km au sud de l'érablière du Ruisseau Clinchamp, conclut que l'érable à sucre serait présent localement depuis le dernier feu survenu il y a 160 à 220 ans. Selon les résultats de ces deux études, les érablières en limite d'aire de répartition pourraient donc être soit le résidu d'un ancien établissement de l'espèce dans la région durant l'Holocène ou une installation récente. En outre, les connaissances actuelles ne nous permettent pas d'établir sous quel régime de feu de forêt l'érable à sucre se maintient à la marge de son aire de distribution.

Le principal objectif de ce mémoire de maîtrise est donc d'étudier la dynamique holocène d'*Acer saccharum* en limite d'aire de répartition dans l'ouest du Québec. Plus spécifiquement, cette étude a pour but d'identifier la date d'établissement d'*Acer saccharum* pour chaque site et d'évaluer l'influence des feux de forêt sur

l'établissement et le maintien de cette espèce. À cet effet, plusieurs hypothèses ont alors été formulées. En se basant sur les résultats paléoécologiques de Richard (1980) et de Pilon et Payette (2015), nous avons testé si i) les érablières en limite d'aire de répartition sont le résultat d'un établissement de l'espèce dans la région vers 8000 cal. BP ou ii) les érablières en limite d'aire de distribution sont issues d'une colonisation récente. Enfin, nous avons tenté d'identifier si i) dans la forêt boréale mixte, soit en limite d'aire de répartition d'*Acer saccharum*, un régime de feux de forêt dominé par des feux sévères — feux de couronnes — limite la présence et le maintien d'*Acer saccharum* et ii) dans la forêt tempérée, soit au sein de l'aire de répartition d'*Acer saccharum*, un régime de feu de forêt dominé par des feux peu sévères — feux de surface — affecte peu ou pas la présence et le maintien de l'espèce.

CHAPITRE II MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Région d'étude

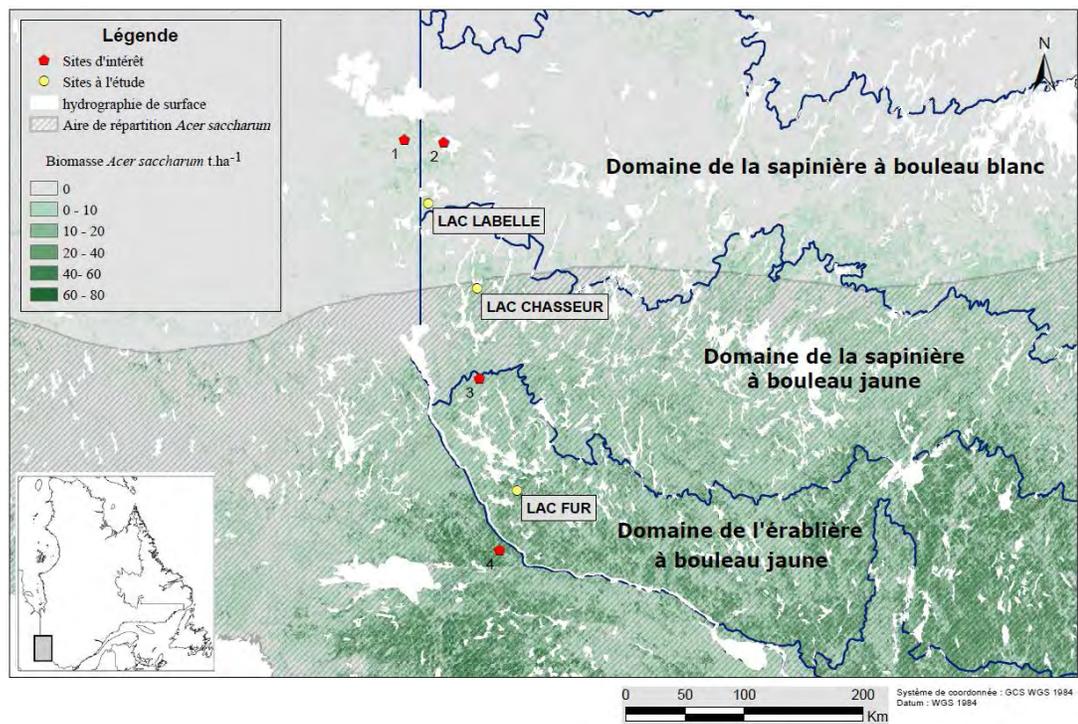


Figure 2.1 : Cartographie de la région d'étude. Sites d'intérêt : 1. Lac Yelle (Richard, 1980), 2. Lac Clo (Richard, 1980), 3. Lac Louis (McAndrews, 1981), 4. Lac Bastien (Bennett, 1987). Délimitation des domaines bioclimatiques (MFFP, 2003). L'aire de répartition de l'érable à sucre est présentée en hachuré (Little, 1971). Dégradé de vert, biomasse d'*Acer saccharum* t.ha⁻¹ (Beaudoin et al., 2014).

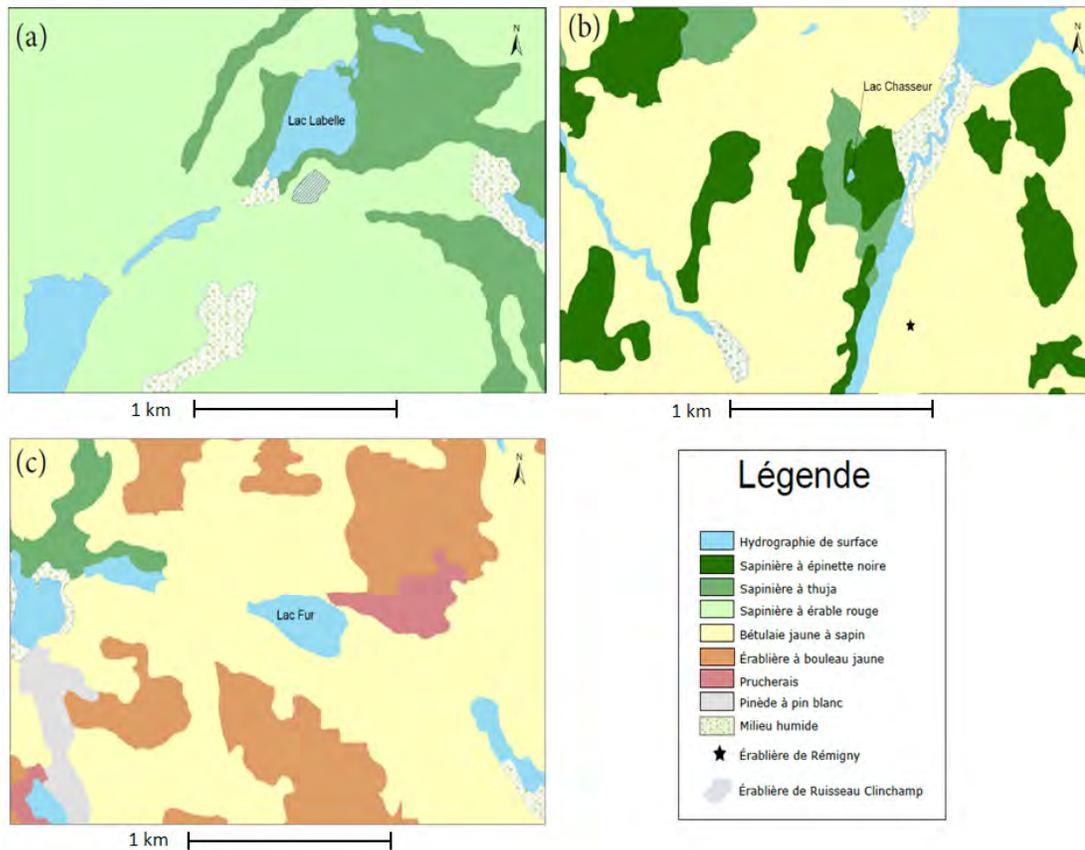


Figure 2.2 : Cartographie des sites à l'étude et types écologiques simplifiés à proximité (MFFP, 2015). (a) Site du lac Labelle. (b) Site du lac Chasseur. (c) Site du lac Fur. Érablière de Rémigny (Pilon et Payette, 2015).

La région d'étude est située en Abitibi-Témiscamingue, dans l'ouest du Québec, à la frontière avec l'Ontario (Figure 2.1). Cette région d'étude se distingue par la présence d'un gradient de végétation avec du sud vers le nord : le domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune, la sapinière à bouleau jaune et la sapinière à bouleau blanc. On constate alors une augmentation progressive des conifères dans les peuplements forestiers. Plusieurs espèces atteignent donc dans cette région la limite septentrionale de leur aire de répartition, telles qu'*Acer saccharum*, *Acer rubrum* L., *Quercus rubra* L., *Ulmus Americana* L., *Fagus grandifolia* Ehrh. et *Tilia americana* L. (MFFP, 2003). Il est cependant possible d'observer des peuplements d'érables à sucre hors de la répartition continue des érablières, notamment dans le domaine de la sapinière à

bouleau jaune où les érablières se développent au haut des collines dans les stations mésiques (Saucier et al., 2009) et aux abords des lacs à l'abri des feux, comme c'est le cas au site du lac Labelle.

Selon les reconstitutions postglaciaires disponibles pour cette région, le retrait de l'inlandis Laurentidien aurait débuté vers 11 000 cal. BP au site du lac Fur et vers 10 500 cal. BP aux sites des lacs Chasseur et Labelle (Dyke, 2004). Suite au retrait de l'inlandis, une grande partie du territoire a été inondée par les lacs pro-glaciaires Ojibway et Barlow (Veillette, 1988, 1994). Parmi les trois sites d'étude, seul celui du lac Fur ne présente pas de dépôts glacio-lacustres suggérant ainsi que le lac proglaciaire Barlow n'a pas inondé le site. Les dates d'exondation – émergence des terres hors de l'eau – des sites Labelle et Chasseur sont reportées dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Localisation, caractéristiques et paramètres environnementaux des sites étudiés. ¹ (MFFP, 2003), ² Lac Labelle : Station de Montbeillard; Lac Chasseur : Station de Rémigny; Lac Fur : Station Rapides-des-Joachims (MDDELCC, 2017), ³Végétation locale : espèces composant les peuplements forestiers adjacents à chaque lac selon les cartes écoforestières (MFFP, 2015) et nos observations de terrain*, ⁴ (Veillette, 1988, 1994), ⁵ (MFFP, 2015).

	Lac Labelle	Lac Chasseur	Lac Fur
Latitude	48° 10'48.87" N	47° 44'44.79" N	46° 42'36.78" N
Longitude	79° 27'25.24" O	79° 5'14.83" O	78° 47'23.04" O
Altitude	375 m	275 m	288 m
Domaine bioclimatique ¹	Sapinière à bouleau blanc	Sapinière à bouleau jaune	Érablière à bouleau jaune
Température moyenne annuelle ²	2.0 °C	2.5 °C	5,1 °C
Précipitation annuelle ²	894.7 mm	909.3 mm	898.8 mm
Végétation locale ³	Thuja occidental Sapin baumier Bouleau à papier Épinette blanche Érable à sucre*	Thuja occidental Sapin baumier Bouleau jaune Bouleau à papier Épinette noire Érable à sucre*	Érable à sucre Bouleau jaune Sapin baumier Bouleau à papier Thuja occidental Érable rouge
Date d'exondation ⁴	10800-10200 cal. BP	10200-9200 cal. BP	NA
Géologie et dépôts de surface ⁵	Till indifférencié	Dépôt glacio-lacustre	Dépôt fluvio-glaciaire, pro-glaciaire
Profondeur d'eau	963 cm	518 cm	549 cm
Épaisseur des sédiments	677 cm	402 cm	546 cm
Résolution temporelle moyenne	16 ans.cm ⁻¹	25 ans.cm ⁻¹	17 ans.cm ⁻¹
Écart type ±	9 ans.cm ⁻¹	7.1 ans.cm ⁻¹	4.79 ans.cm ⁻¹

2.2 Sélection des sites

Nous avons défini un transect nord-sud de trois sites afin de couvrir un gradient de dominance par l'érable à sucre avec soit : une population marginale, une population en limite d'aire de répartition et une population au sein de l'aire de répartition de l'espèce. Ainsi, à 150 mètres du lac Labelle (Figure 2.2) se trouve une des érablières les plus isolées de son aire de répartition actuelle. Le site du lac Chasseur se situe pour sa part à la limite nordique de l'aire de répartition continue de l'érable à sucre (Figure 2.1).

En outre, ce site est présent à environ 800 m d'un site ayant fait l'objet d'une étude paléoécologique (Figure 2.2, site de Rémigny, Pilon et Payette, 2015). Enfin, le lac Fur est situé en plein cœur de la forêt tempérée nordique québécoise, dans l'érablière à bouleau jaune où l'érable à sucre est présent de manière continue et où le régime de perturbation est dominé par une dynamique de trouées de petite taille (Saucier et al. 2009; Després et al. 2014).

2.3 Échantillonnage des sites

Le site du lac Labelle a fait l'objet d'une mission de terrain en octobre 2015 et les sites des lacs Chasseur et Fur ont quant à eux été échantillonnés en mai 2016. La profondeur des lacs a été déterminée à l'aide d'un sonar *Lowrance X-4*. Le carottage a été effectué sur une plateforme dans la zone la plus profonde des lacs. L'échantillonnage de chaque site comprend deux séries sédimentaires complètes. La partie récente des sédiments (0 à 50 cm environ) a été échantillonnée à l'aide d'un carottier *Kajak-Brinkhurst*. Les carottes extraites à l'aide du KB ont été découpées sur place à une résolution d'un (1) centimètre et les échantillons ont été placés dans des sacs scellés et annotés. Le carottage du reste des sédiments a été effectué avec un carottier *Livingstone*. Une fois extraites du carottier, les carottes ont été emballées dans un film plastique, puis du papier d'aluminium. Ces carottes ont finalement été découpées au laboratoire à un intervalle de un (1) centimètre.

2.4 Analyses de laboratoire

2.4.1 Modèle d'âge-profondeur

Cinq mesures AMS ^{14}C pour le site Labelle et six pour les sites Fur et Chasseur ont été effectuées. Ces mesures ont été réalisées sur des macrorestes organiques pour le site

Chasseur et sur des portions de 5 cm d'épaisseur de gyttja, préalablement séchées, pour les deux autres sites (Tableau 2.2). La mesure de l'activité du ^{210}Po a permis d'inférer l'activité du ^{210}Pb (Flynn, 1996) de dix échantillons de surface (0 à 22 cm) pour chacun des sites. L'application du *Constant Rate of Supply model* (CRS, Appleby and Oldfieldz, 1983) a finalement permis d'estimer à partir de l'activité du ^{210}Pb l'âge des échantillons de surface. L'utilisation du package R clam 2.2 (Blaauw, 2010) a permis de calibrer les dates AMS ^{14}C selon la courbe de calibration IntCal13 (Reimer et al., 2013) puis de construire un modèle âge-profondeur basé sur ces dates calibrées et sur les âges issus du modèle CRS (^{210}Po). Afin de construire le modèle d'âge, pour chaque date (^{14}C et ^{210}Po), un âge a été choisi de manière aléatoire en fonction de la densité de probabilité de chaque date, une fonction de lissage LOWESS a ensuite été utilisée pour relier les dates. Le paramètre de lissage du LOWESS fut choisi en fonction du modèle le plus parcimonieux pour chaque lac, c'est-à-dire celui maximisant la régularité de l'accumulation sédimentaire tout en minimisant la distance à chaque date. Cette procédure a été répétée 1000 fois, afin d'estimer un intervalle de confiance de 95 % autour du modèle âge profondeur médian utilisé pour le reste des analyses.

Tableau 2.2 : Datations ^{210}Pb et ^{14}C utilisées pour la création des modèles âge-profondeur. BP = *Before present* ou avant 1950.

Lac Labelle					
Profondeur (cm)	Code laboratoire	Age ^{14}C (BP)	Age ^{210}Pb (AD)	Age calibrés BP ($\pm 2\sigma$)	Matériel daté
0-1	LBLpb001		2013 \pm 1		gyttja
4-5	LBLpb002		2004 \pm 1		gyttja
6-7	LBLpb003		1998 \pm 1		gyttja
8-9	LBLpb004		1990 \pm 2		gyttja
10-11	LBLpb005		1979 \pm 2		gyttja
12-13	LBLpb006		1964 \pm 3		gyttja
14-15	LBLpb007		1952 \pm 4		gyttja
16-17	LBLpb008		1933 \pm 6		gyttja

75-80	ULA-5954	770 ± 15	690 (674 -710)	gyttja
155-160	ULA-5955	1430 ± 15	1323 (1300 – 1348)	gyttja
315-320	ULA-5956	2840 ± 15	2943 (2917 – 2996)	gyttja
475-480	ULA-5957	4630 ± 20	5420 (5383 – 5448)	gyttja
625-630	ULA-5958	8940 ± 25	10056 (10119 – 10197)	gyttja argileuse
Lac Chasseur				
0-1	CHApb001		2005 ± 1	gyttja
4-5	CHApb002		1977 ± 3	gyttja
6-7	CHApb003		1966 ± 3	gyttja
112-113	ULA-6366	2535 ± 15	2716 (2698 – 2742)	macroreste
180-181	ULA-6363	3245 ± 15	3462 (3442 – 3484)	macroreste
249-249	ULA-6364	4725 ± 15	5475 (5529 – 5579)	macroreste
296-297	ULA-6365	5410 ± 15	6241 (6196 – 6278)	macroreste
320-325	CHA841-844	6360 ± 30	7292 (7247 – 7336)	gyttja
369-370	CHA887-888	8000 ± 41	8874 (8715 – 9009)	gyttja
Lac Fur				
0-1	FURpb001		2008 ± 1	gyttja
4-5	FURpb002		1983 ± 2	gyttja
6-7	FURpb003		1965 ± 3	gyttja
8-9	FURpb004		1946 ± 4	gyttja
10-11	FURpb005		1921 ± 4	gyttja
35-40	ULA-6357	1230 ± 20	1174 (1169 – 1187)	gyttja
133-140	ULA-6358	2365 ± 15	2356 (2343 – 2382)	gyttja
235-240	ULA-6359	3650 ± 15	3964 (3904 – 3991)	gyttja
335-340	ULA-6360	4625 ± 15	5424 (5404 – 5446)	gyttja
435-440	ULA-6361	6515 ± 15	7431 (7420 – 7460)	gyttja
530-535	ULA-6362	8185 ± 20	9116 (9029 – 9144)	gyttja

2.4.2 Analyses palynologiques et reconstitution de la végétation

2.4.2.1 Méthodologie générale

L'extraction pollinique a été effectuée à un pas d'échantillonnage constant donnant ainsi un total de 83 échantillons pour les sites Labelle et Chasseur et 95 pour le site Fur. Suivant le protocole développé par Faegri et Iversen (1964), des sous-échantillons de 1 cm³ de gyttja ont subi différents traitements acido-basiques ainsi qu'un tamisage à 150 µm puis à 15 µm. Une capsule de pollen de lycopode de concentration connue (20 848 spores ± 1546) a été ajoutée à chaque échantillon, permettant ainsi de connaître la concentration pollinique des espèces composant le spectre pollinique. L'identification des pollens a été réalisée par comparaison à des manuels d'identification (McAndrews et al., 1973; Richard, 1970) et de la collection de référence du laboratoire de Paléocologie de l'université de Montréal. Un minimum de

250 pollen a été dénombré par échantillon. La concentration pollinique a été calculée en suivant la formule ci-dessous.

$$\begin{aligned} & \text{Concentration pollinique (\#grains de pollen/cm}^3\text{)} \\ &= \frac{\text{\#grains de pollen} \times \text{\# spores de lycopode}}{\text{Total de spores de lycopode contenu dans 1 tablette (20848} \pm \text{1546)}} \end{aligned}$$

Par la suite, l'influx pollinique a été calculé selon la formule suivante.

$$\begin{aligned} & \text{Influx pollinique (\#grains de pollen d'un taxon. cm}^{-2}\text{. an}^{-1}\text{)} \\ &= \text{Concentration pollinique} \\ & \times \text{taux d'accumulation sédimentaire} \end{aligned}$$

2.4.2.2 Seuil pollinique local

Afin de tenir compte de la possible surreprésentation des taxons polliniques, des seuils de présence/absence locaux (< 20 km) ont été utilisés (Davis et Jacobson, 1985, Davis et al., 1991). De manière générale, les seuils ont été définis par les auteurs selon la capacité de transport et de production pollinique d'un taxon. Plus ce dernier produit une grande quantité de pollen et/ou ses pollens sont transportés sur de longues distances, plus le seuil sera élevé. Pour appliquer ces seuils, cette procédure a alors été mise en place :

Exemple pour *Betula* sp.

1. Calcul du seuil pollinique local

$$\begin{aligned} & \text{Seuil pollinique } \textit{Betula} \text{ sp. (\#grains de pollen. cm}^{-2}\text{. an}^{-1}\text{)} \\ &= \text{seuil } \textit{Betula} \text{ sp. (10\%)} \\ & \times \text{influx pollinique total de l'échantillon} \end{aligned}$$

2. Calcul de l'influx pollinique local

Influx pollinique local Betula sp.

= *influx pollinique Betula sp. – seuil pollinique Betula sp.*

- Présence locale du taxon si *Influx pollinique local* ≥ 0
- Absence locale du taxon si *Influx pollinique local* ≤ 0

Seuls les influx polliniques locaux ≥ 0 sont présentés par les diagrammes polliniques. Une valeur de 0 est alors attribuée lorsque l'influx pollinique local est ≤ 0 . Une zonation des diagrammes polliniques a ensuite été faite en se basant sur les principaux changements de végétation observés.

2.4.2.3 Nomenclature des taxons

Une des faiblesses de la palynologie réside dans l'incapacité d'identifier avec certitude l'espèce associée à certains palynomorphes comme le *Thuja/Juniperus*, *Betula glandulosa/allegghaniensis/papyrifera* et *Pinus banksiana/resinosa*. Il est cependant possible, au regard de la littérature et des autres taxons polliniques identifiés, de favoriser certains taxons. Ainsi, dans le cas de *Juniperus/thuja*, une analyse des macrorestes (Yu, 1997) a permis d'identifier que le *Juniperus* est principalement présent au début de l'Holocène alors que le *Thuja* serait dominant seulement à partir du milieu de l'Holocène (5000-6000 cal. BP). Même constat pour le *Betula* qui est davantage représenté par *Betula glandulosa* au début de l'Holocène et *Betula papyrifera* ou *allegghaniensis* à partir du milieu de l'Holocène (Richard, 1977). Enfin, selon plusieurs analyses macrofossiles, *Pinus banksiana* a toujours été dominant par rapport au *Pinus resinosa* et donc que l'apport pollinique de ce taxon peut être principalement attribué au *Pinus banksiana* (Delcourt, 1979, Watts, 1979). Lorsque mentionnée dans le texte, les taxons pour lesquelles nous sommes dans l'incapacité d'identifier avec certitude l'espèce seront donc accompagnés de la mention cf. (ex : *Betula cf. glandulosa*, cf. *Thuja*, cf. *Juniperus* etc.).

2.4.3 Analyses des charbons de bois

La reconstitution des événements de feux de forêt à l'échelle locale a été réalisée par l'analyse contiguë (c.-à-d. tous les centimètres) du contenu en charbons de bois dans 1 cm³ de sédiment. Ces sous-échantillons ont été immergés dans une solution d'hydrochlorite de sodium à 8% durant environ 12 h afin d'être défloculés et blanchis. Un tamisage à 150 µm a ensuite été effectué afin de conserver seulement les macro-charbons. L'analyse des particules de charbons de bois a été réalisée à l'aide d'une loupe binoculaire équipée d'une caméra et assistée d'un logiciel d'analyse d'image (Winseedle 2015). Le logiciel Winseedle a permis de mesurer le nombre ainsi que la surface totale des charbons par cm³ de sédiment.

L'historique des feux a été reconstruit à l'aide du logiciel CharAnalysis (librement disponible à <https://github.com/phiguera/CharAnalysis>) (Higuera et al., 2011). La reconstruction des événements de feux par CharAnalysis se réalise en trois étapes consécutives, soit le prétraitement, le lissage et l'analyse des pics. La première étape consiste à calculer à un pas de temps médian le *Charcoal Accumulation Rate* (#charbons ou mm².cm⁻². an⁻¹) en multipliant la concentration de charbons au taux d'accumulation sédimentaire. La deuxième étape permet de lisser les données de CHAR et ainsi de soustraire la composante basse fréquence du signal (CHAR_{back}), pour seulement conserver le CHAR_{peak}. Le lissage des données a été effectué en suivant une fonction LOWESS (*Locally Weighted Scatterplot Smoothing* ou Régression polynomiale avec pondération locale) selon une fenêtre temporelle donnée de 500 ans pour le lac Labelle et de 700 ans pour les lacs Chasseur et Fur. L'application d'un modèle de type double gaussien (*gaussian mixture model*) permet ensuite d'isoler au sein du CHAR_{peak} le CHAR_{noise}, représentant la variabilité due au mélange sédimentaire, à l'échantillonnage et au bruit naturel et le CHAR_{fire}, représentant les pics de charbons provenant de feux locaux (<10 km). Considérant la résolution temporelle

(11 à 25 ans/cm), un pic de feu identifié par CharAnalysis pourrait également correspondre à deux événements de feu distincts.

Cette analyse de CharAnalysis a été effectuée d'une part avec le nombre de particules/cm³ (CHAR_#) et d'autre part avec la surface totale de charbons/cm³ (CHAR_{surf}). Deux scénarios d'historique de fréquence des feux sont donc présentés et analysés, soit le $f_{\#}$ (fréquence des feux issue du CHAR_#) et le f_{surf} (fréquence des feux issue du CHAR_{surf}).

2.4.4 Pertes au feu

L'analyse de perte au feu a été effectuée en continu tous les centimètres et consistait dans un premier temps à peser un sous-échantillon de 1 cm³ avant (pesée #1) et après dessiccation (pesée #2) (105° Celsius durant 12 h) pour évaluer le contenu en eau suivant le protocole de Chambers et al. (2011). Ces mêmes sous-échantillons ont ensuite été placés dans un four à 550° Celsius durant quatre heures, brûlant ainsi la matière organique. Une troisième pesée a alors permis de déterminer la quantité (g) de matière organique ayant brûlé durant cette étape. Pour finir, les échantillons sont chauffés à 1000° Celsius, permettant ainsi de connaître la part des carbonates.

2.5 Analyses statistiques

Des tests de corrélation non paramétrique de Spearman ont été effectués afin d'évaluer la dépendance entre les influx polliniques des principales espèces, le f_{surf} , le $f_{\#}$, le CHAR_{surf} et le CHAR_#. Afin d'effectuer ces tests, il a été nécessaire d'homogénéiser la résolution temporelle des données f_{surf} , $f_{\#}$, CHAR_{surf} et CHAR_# à celle des influx polliniques dont la résolution temporelle est plus faible. Ainsi, la moyenne de ces quatre variables (f_{surf} , $f_{\#}$, CHAR_{surf}, CHAR_#) a été calculée sur une fenêtre temporelle de 250 ans, soit 125 ans avant et 125 ans après la date associée à chaque échantillon

pollinique. Les coefficients de corrélation obtenus ont alors permis de construire des matrices de corrélation présentées en annexe.

2.6 Données climatiques

Afin d'évaluer la réponse de la végétation et de la fréquence des feux aux changements climatiques holocène, les données climatiques issues du logiciel gratuit Paleoview v1.1, disponible à <https://github.com/GlobalEcologyLab/PaleoView>, ont été utilisées (Fordham, Saltré, Brown, et al., 2017; Fordham, Saltré, Haythorne, et al., 2017). Les données climatiques de Paleoview sont issues du projet TraCE-21Ka dont l'objectif était de fournir une modélisation climatique à haute résolution pour la période 22 000 cal. BP à aujourd'hui (1989 AD) en se basant sur le modèle climatique mondial CCSM3 (Collins et al., 2006). Les anomalies de précipitations (mm.j^{-1}) et de températures ($^{\circ}\text{C}$) du printemps (Mars, Avril, Mai) et de l'été (Juin-Juillet-Août) ont été simulées à une résolution temporelle de 30 ans. Les anomalies correspondent à l'écart entre les données paléoclimatiques simulées et les données actuelles (1975 AD). La médiane et l'intervalle de confiance à 90 % ont été calculés selon la distribution des anomalies pour les différents pixels à une résolution temporelle de 30 ans. La résolution spatiale du CCSM3 ($2,5^{\circ}$ latitude par $3,75^{\circ}$ longitude) a été réduite (*downscale*) à un pixel de $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ par Paleoview en utilisant une interpolation bilinéaire (Fordham, Saltré, Brown, et al., 2017). Les données climatiques ont été extraites pour les pixels compris entre les latitudes 50° N et 45° N et les longitudes 80° O et $77,5^{\circ}$ O.

CHAPITRE III RÉSULTATS

3.1 Sédimentation et chronologie

Les sédiments du lac Fur sont composés de *gyttja* du début jusqu'à la fin de la carotte (0-540 cm). Aucune transition silto-argileuse n'est donc à noter. Le taux d'accumulation moyen est de $0,062 \text{ cm.an}^{-1}$ ($\pm 0,017 \text{ cm.an}^{-1}$), pour une résolution temporelle moyenne de $17,2 \text{ ans.cm}^{-1}$ ($\pm 4,8 \text{ ans.cm}^{-1}$).

Les sédiments du lac Labelle sont composés de *gyttja* de 0 à 610 cm de profondeur, puis de *gyttja* silto-argileuse entre 610 et 650 cm de profondeur. Une transition entre ces deux types de sédiments est observée entre 610 et 620 cm avec une tendance à l'augmentation de la fraction minérale (silt et argile). Le taux d'accumulation moyen est de $0,078 \text{ cm.an}^{-1}$ ($\pm 0,033 \text{ cm.an}^{-1}$) donnant ainsi une résolution temporelle moyenne de 16 ans.cm^{-1} ($\pm 9 \text{ ans.cm}^{-1}$).

Les sédiments du lac Chasseur sont composés de *gyttja* de 0 à 330 cm de profondeur, puis de *gyttja* silto-argileuse de 330 à 373 cm de profondeur. On notera cependant la présence de plusieurs couches silto-argileuses, notamment à 55 cm, 78 cm et 99 cm ainsi que la présence de nombreux macrorestes organiques. Le taux d'accumulation moyen est de $0,046 \text{ cm.an}^{-1}$ ($\pm 0,018 \text{ cm.an}^{-1}$) et la résolution temporelle moyenne est de 24 ans.cm^{-1} ($\pm 7,3 \text{ ans.cm}^{-1}$).

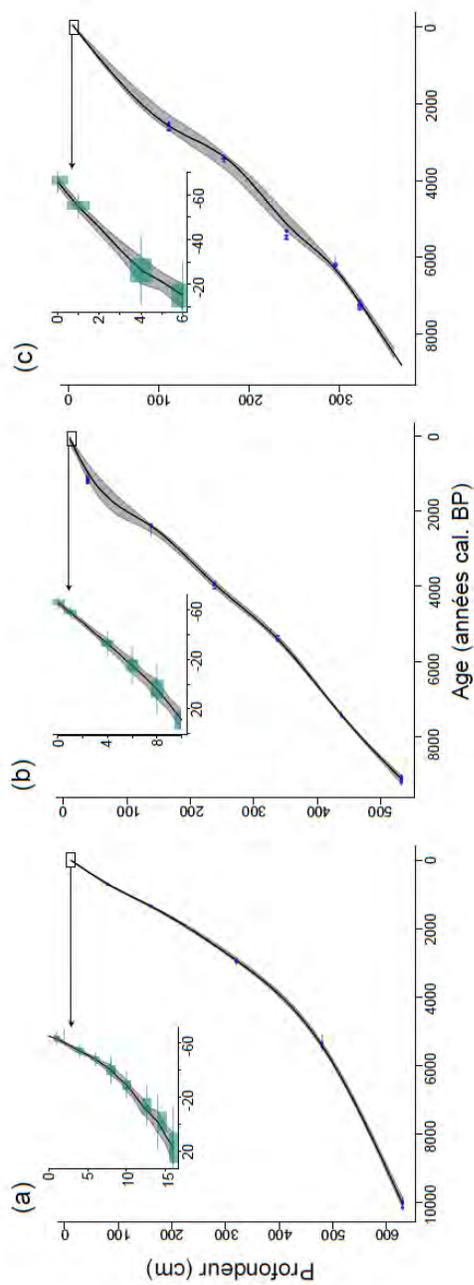


Figure 3.1 : (a) modèle âge-profondeur du site Labelle basé sur une fonction lissée avec un paramètre de lissage égal à 0, 16. (b) modèle âge-profondeur du site Chasseur basé sur une fonction *smooth spline* avec un paramètre de lissage égal à 0,2. (c) modèle âge-profondeur du site Fur basé sur une fonction *smooth spline* avec un paramètre de lissage = 0, 16. Le meilleur modèle d'âge-profondeur est représenté par la ligne noire et l'intervalle de confiance à 95 % est représenté par l'enveloppe grise. Les dates ^{14}C et l'intervalle de confiance à 95 % sont représentés par les points bleus. Les dates ^{210}Pb et les intervalles de confiance à 95 % sont représentés par les carrés et lignes verts dans les encadrés.

3.2 Généralités sur l'historique des feux

3.2.1 Lac Fur

L'analyse du $CHAR_{surf.}$ et du $CHAR_{\#}$ par CharAnalysis a permis d'identifier respectivement 46 et 24 événements de feux (Tableau 3.1). Parmi ces événements, 16 sont identifiés par les deux scénarios. Le FRI moyen obtenu par le $CHAR_{surf.}$ est alors de 204 ans contre 395 ans pour le $CHAR_{\#}$. D'après le test de Kruskal-Wallis, la différence entre le $f_{surf.}$ et le $f_{\#}$ est significative ($p\text{-value} < 0,05$). Les deux scénarios de fréquence de feux sont similaires seulement de 1000 cal. BP à aujourd'hui et la plus grande différence apparaît vers 5000 cal. BP avec d'une part 7 feux/1000 ans pour le $f_{surf.}$ et 2,5 feux/1000 ans pour le $f_{\#}$ (Figure 3.4).

3.2.2 Lac Chasseur

L'analyse a identifié 43 événements de feux avec le $CHAR_{surf.}$ contre 29 avec le $CHAR_{\#}$. Parmi ces événements, 27 sont communs aux deux scénarios (Tableau 3.1). Le FRI moyen est estimé à 213 ans par le $CHAR_{surf.}$ et 320 ans par le $CHAR_{\#}$. Un test de Kruskal-Wallis effectuée entre le $f_{surf.}$ et le $f_{\#}$ nous indique que la différence entre les deux scénarios de fréquence des feux (surface et nombre) n'est pas significative ($p\text{-value} > 0,05$). La plus grande différence entre les deux scénarios apparaît vers 1500 cal. BP avec d'une part un $f_{surf.}$ à environ 6,5 feux/1000 ans contre 1 feu/1000 ans pour le $f_{\#}$ (Figure 3.6).

3.2.3 Lac Labelle

L'analyse du $CHAR_{surf.}$ et du $CHAR_{\#}$ par CharAnalysis a permis d'identifier respectivement 59 et 50 pics, chaque pic correspondant à des événements de feux locaux soit à < 10 km (Higuera et al., 2009, Tableau 3.1). Parmi ces événements, 33 pics sont retrouvés par les deux scénarios. La plus grande différence entre les deux scénarios apparaît vers 1000 cal. BP avec d'une part une fréquence estimée par la surface des charbons ($f_{surf.}$)

à 10 feux/1000 ans contre une fréquence estimée par le nombre des charbons ($f_{\#}$) à 4 feux/1000 ans (Figure 3.8). Le FRI moyen estimé par le $CHAR_{surf.}$ est de 179 ans contre 200 ans pour celui obtenu par le $CHAR_{\#}$. Un test de Kruskal-Wallis effectuée entre le $f_{surf.}$ et le $f_{\#}$ nous indique que la différence entre les deux scénarios de fréquence des feux n'est pas significative ($p\text{-value}>0,05$).

Tableau 3.1 : Généralités sur l'historique des feux. Comparaison de l'historique des feux pour chaque site basé sur l'analyse des séries de CHAR exprimés en surface ($CHAR_{surf.}$) et en nombre ($CHAR_{\#}$). Le FRI (*Fire Return Interval*) moyen est exprimé en années et correspond au temps moyen entre deux feux pour chaque site et chaque scénario. Les tests non paramétriques de Kruskal-Wallis ont été effectués entre le $f_{\#}$ et le $f_{surf.}$.

	Lac Labelle		Lac Chasseur		Lac Fur	
	$CHAR_{surf.}$	$CHAR_{\#}$	$CHAR_{surf.}$	$CHAR_{\#}$	$CHAR_{surf.}$	$CHAR_{\#}$
#feux	59	50	43	29	46	24
#feux/1000 ans moyen	$f_{surf.}= 5,62$	$f_{surf.}= 4,77$	$f_{surf.}= 4,73$	$f_{\#}= 3,19$	$f_{surf.}= 4,82$	$f_{\#}= 2,52$
FRI moyen	179	200	213	320	204	395
Test Kruskal-Wallis	p-value=0.4939		p-value=0.4901		p-value=0.0001291	

3.2.4 Synthèse des sites

Le temps de retour moyen entre deux feux (FRI) est plus faible au site du lac Labelle que ce soit pour le $CHAR_{surf.}$ ou le $CHAR_{\#}$ (Tableau 3.1). Les FRI moyens issus du $CHAR_{surf.}$ sont pour leurs parts relativement similaires pour les sites Chasseur et Fur. La différence est cependant plus marquée si l'on compare les FRI moyens issus du $CHAR_{\#}$.

Les trois sites présentent des divergences entre l'occurrence des feux issue du $f_{surf.}$ et du $f_{\#}$ (Figure 3.2). Ainsi, nous pouvons noter que 1) la médiane du $f_{surf.}$ est toujours plus élevée que celle du $f_{\#}$ pour chaque site et 2) la différence entre le $f_{surf.}$ et le $f_{\#}$ tend à augmenter du nord vers le sud. Cette différence est non-significative pour les sites Chasseur et Labelle et significative pour le site Fur (Tableau 3.1).

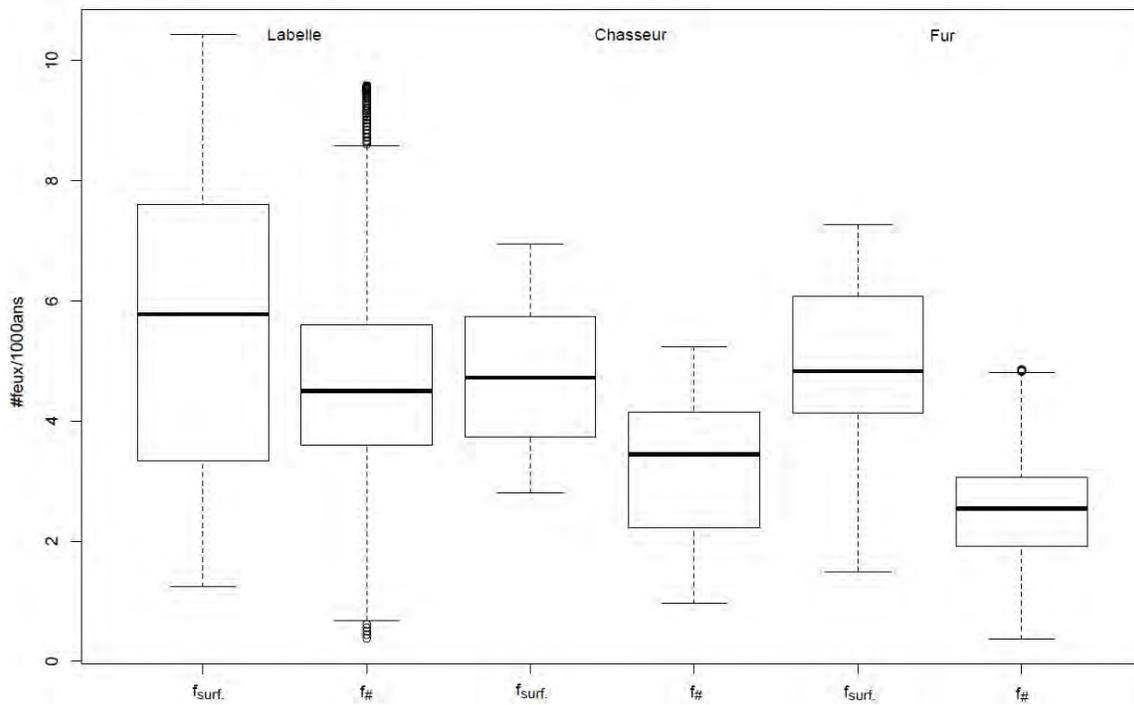


Figure 3.2 : Boîte à moustache de l'occurrence des feux/1000 ans selon le $f_{surf.}$ et le $f_{\#}$ pour chaque site.

3.3 Histoire holocène de la végétation et des feux

3.3.1 Lac Fur

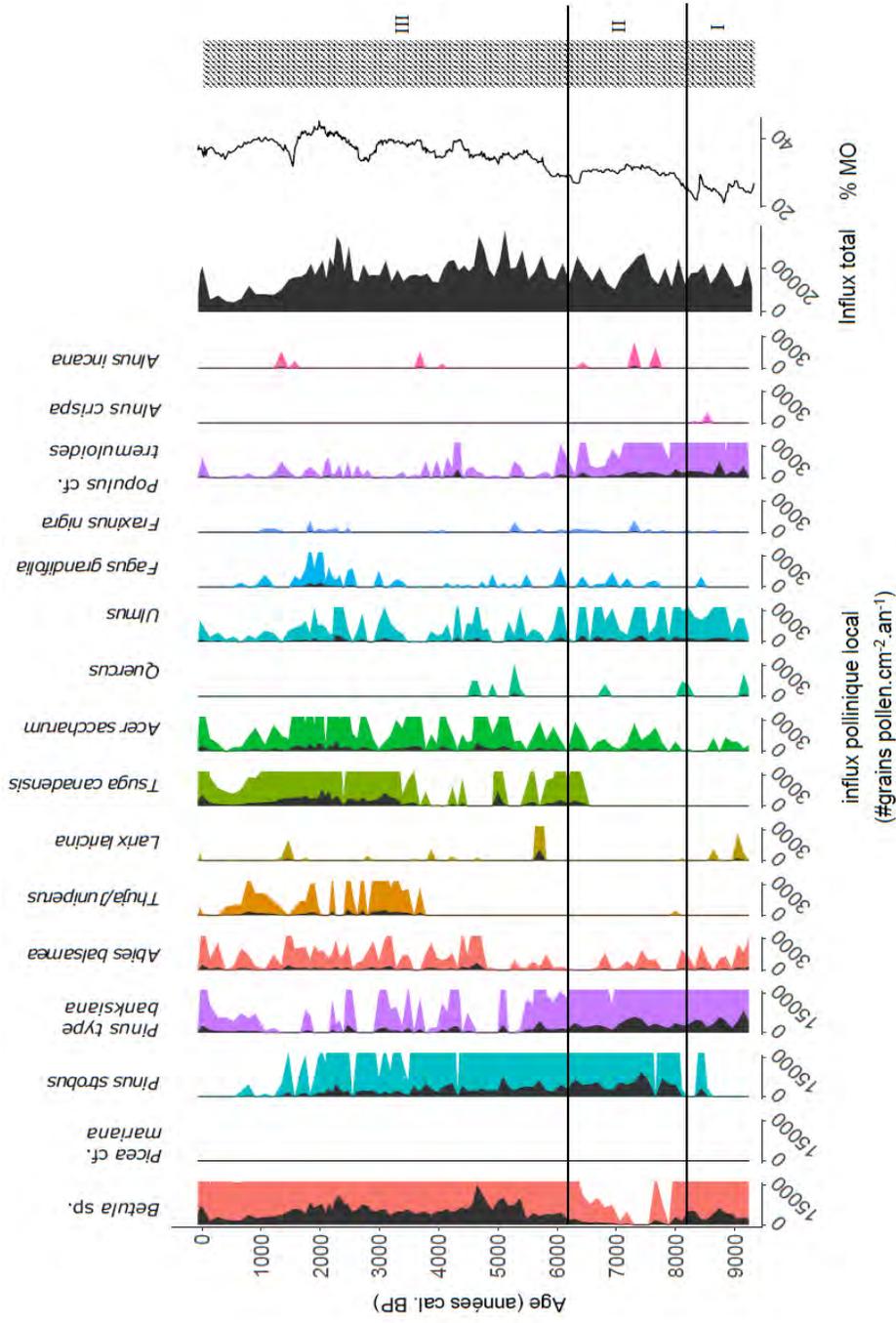


Figure 3.3 : Diagramme pollinique simplifié du lac Fur. Les influx polliniques locaux sont des valeurs corrigées après l'application des seuils de présence/absence. Le diagramme complet est disponible en annexe (Annexe 1). Les chiffres romains (I, II, III) réfèrent aux zones polliniques. %MO = pourcentage de matière organique déterminé par la perte au feu. Le log stratigraphique indique en gris les sédiments silto-argileux et le motif texturé représente les sédiments organiques de type *gyttja*.

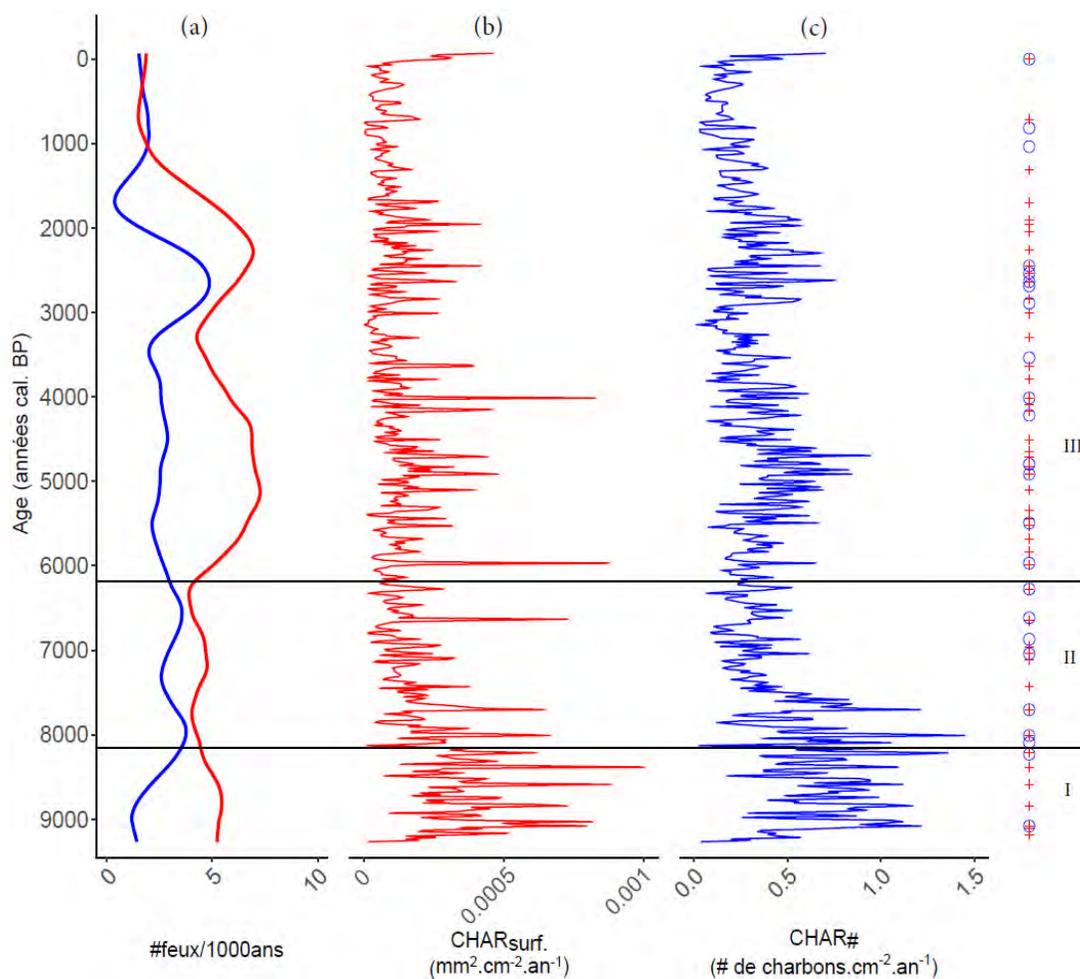


Figure 3.4 : Accumulation de charbons de bois macroscopiques ($\geq 150 \mu\text{m}$) et historique des feux du lac Fur. (a) Fréquences des feux. Rouge = Fréquence des feux issue du $\text{CHAR}_{\text{surf}}$ (f_{surf}). Bleu = Fréquence des feux issue du $\text{CHAR}_{\#}$ ($f_{\#}$). (b) Charcoal accumulation rate de la surface (rouge = $\text{CHAR}_{\text{surf}}$) et du nombre (bleu = $\text{CHAR}_{\#}$) des charbons. (c) Événements de feux détectés par CharAnalysis. Signe positif rouge = événements de feux détectés par l'analyse du $\text{CHAR}_{\text{surf}}$. Rond bleu = événements de feux détectés par l'analyse du $\text{CHAR}_{\#}$.

La zone I, de 9200 à 8100 cal. BP, est principalement caractérisée par *Pinus type banksiana*, *Populus cf. tremuloides* et *Betula sp*, mais également par la présence mineure d'*Acer saccharum* et d'*Ulmus*. Le $\text{CHAR}_{\text{surf}}$ et le $\text{CHAR}_{\#}$ sont plus élevés durant cette période que pour le reste de l'Holocène et la fréquence des feux diffère selon le scénario observé. Le %MO est alors à son minimum holocène et oscille entre 20 et 30 %.

La zone II, de 8100 à 6100 cal. BP est caractérisée par le déclin de *Betula* sp., la hausse de *Pinus strobus* et de *Pinus type banksiana* ainsi que l'augmentation d'*Acer saccharum* et l'apparition de *Fagus grandifolia* Ehrh.. Le %MO atteint un plateau à 30 % qui se maintient jusqu'à nos jours. Le CHAR_{surf.} et le CHAR_# connaissent une baisse dès 8000 cal. BP et chaque scénario de fréquence des feux demeure relativement stable avec la f_{surf.} à environ 5 feux/1000 ans contre 3-4 feux/1000 ans pour la f_#. On constate également une diminution progressive de *Pinus type banksiana*, *Pinus strobus* et *Populus cf. tremuloides* dès 7000 cal. BP.

La zone III qui débute vers 6100 cal. BP, est caractérisée par une forte augmentation de *Betula* sp. et d'*Acer saccharum* à partir de 6000 cal. BP, mais également par l'apparition de *Tsuga canadensis*. On constate jusqu'à nos jours une tendance à la diminution des espèces du genre *Pinus* ainsi que l'apparition de *Thuja/Juniperus* et l'augmentation de *Tsuga canadensis* vers 4500 cal. BP. Alors que le *Pinus strobus* semble disparaître du paysage dès 1200 cal. BP, on note une réapparition de *Pinus type banksiana* vers 200 cal. BP. Une baisse graduelle du CHAR_# et du CHAR_{surf.} peut également être observée au cours de cette période. Les fréquences des feux issus des deux scénarios (f_# et f_{surf.}) connaissent une légère augmentation entre 6000 et 4000 cal. BP et vers 2500 cal. BP pour ensuite diminuer jusqu'à nos jours à environ 1 feu/1000 ans.

3.3.2 Lac Chasseur

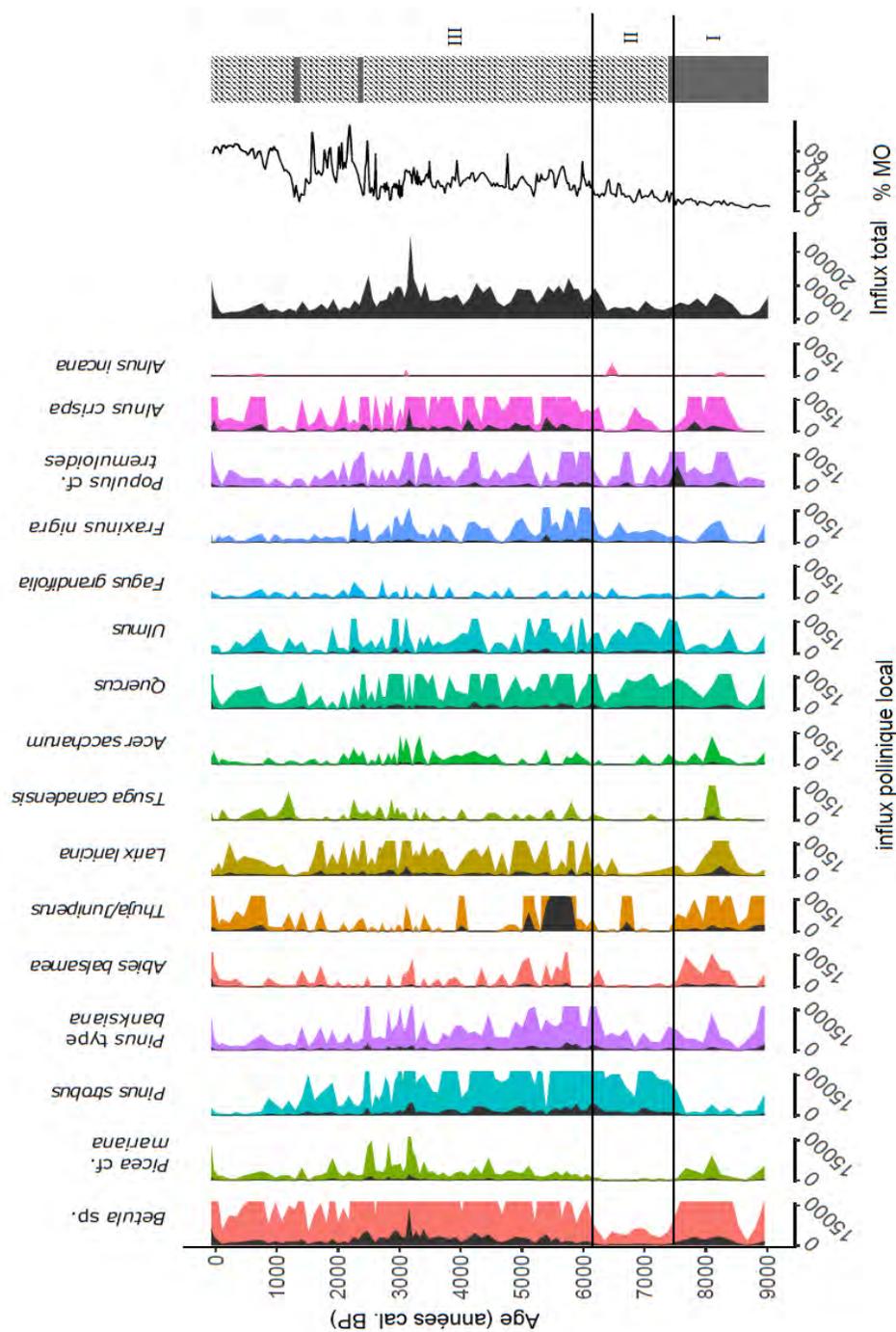


Figure 3.5 : Diagramme pollinique simplifié du lac Chasseur. Les influx polliniques locaux sont des valeurs corrigées après l'application des seuils de présence/absence. Le diagramme complet est disponible en annexe (Annexe B). Les chiffres romains (I, II, III) réfèrent aux zones polliniques. %MO = pourcentage de matière organique déterminé par la perte au feu. Le log stratigraphique indique en gris les sédiments silto-argileux et le motif texturé représente les sédiments organiques de type *gyttja*.

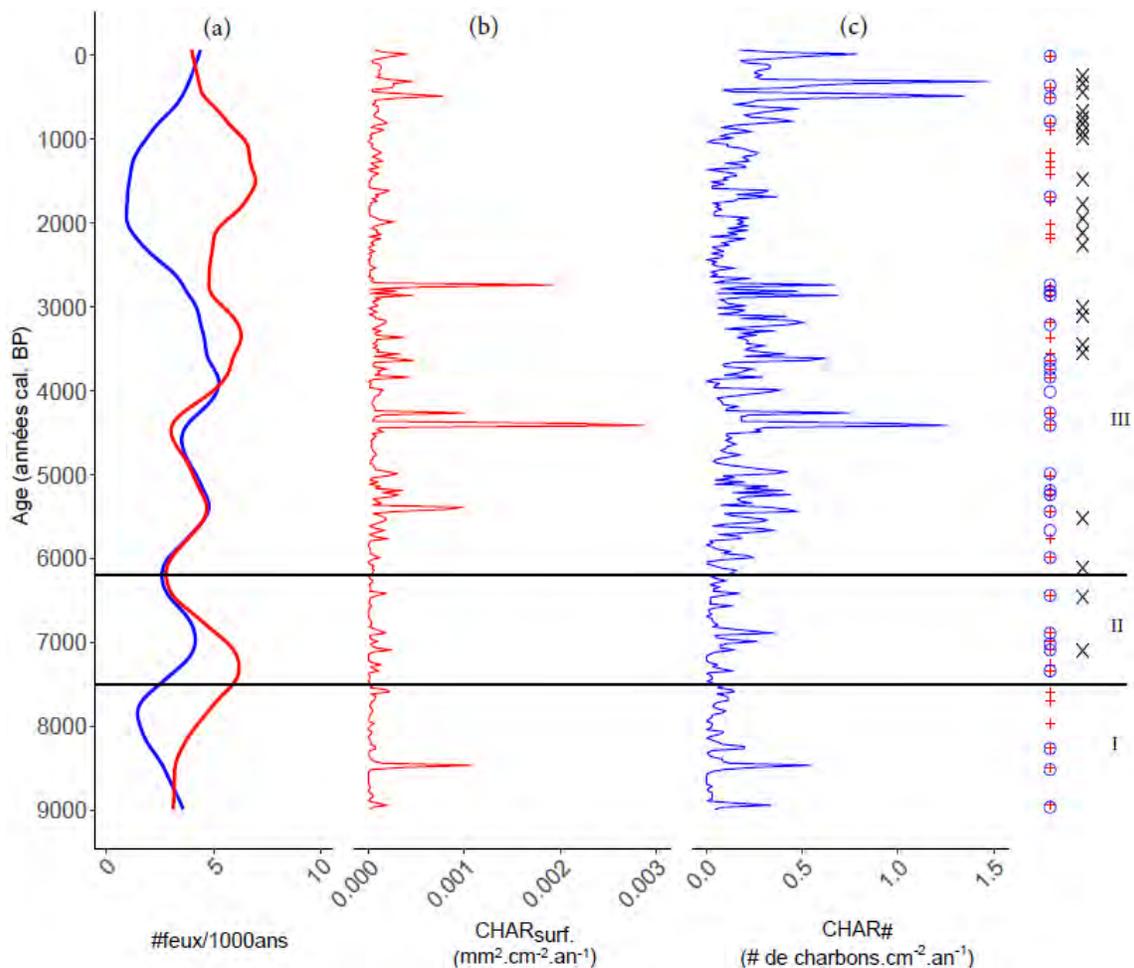


Figure 3.6 : Accumulation de charbons de bois macroscopiques ($\geq 150 \mu\text{m}$) et historique des feux du lac Chasseur. (a) Fréquences des feux. Rouge = Fréquence des feux issue du $\text{CHAR}_{\text{surf}}$ (f_{surf}). Bleu = Fréquence des feux issue du $\text{CHAR}_{\#}$ ($f_{\#}$). (b) *Charcoal accumulation rate* de la surface (rouge = $\text{CHAR}_{\text{surf}}$) et du nombre (bleu = $\text{CHAR}_{\#}$) des charbons. (c) Événements de feux. Signe positif rouge = événements de feux détectés par l'analyse du $\text{CHAR}_{\text{surf}}$. Rond bleu = événements de feux détectés par l'analyse du $\text{CHAR}_{\#}$. X noir = événements de feux identifiés par l'analyse des charbons de bois minéraux de l'érablière de Rémigny, scénario maximal (Pilon et Payette, 2015).

La zone I, de 9000 à 7500 cal. BP, se distingue par un influx pollinique total relativement faible dominée par *Betula* sp., *Pinus type banksiana*, *Thuja/Juniperus* et *Populus cf. tremuloides*. On notera également la présence mineure d'*Acer saccharum*, *Quercus*, *Ulmus*, *Larix laricina*, *Abies balsamea* et *Alnus crispa*. Le %MO augmente graduellement, passant de 3 % à 10 % vers 7500 cal. BP. Le CHAR ($\text{CHAR}_{\text{surf}}$ et $\text{CHAR}_{\#}$) est relativement

faible durant cette période et présente seulement quelques pics alors que la fréquence des feux oscille entre 2 et 5 feux selon le scénario observé.

La zone II, comprise entre 7500 et 6100 cal. BP, est caractérisée par la diminution de *Betula* sp. et *Picea mariana*, et de l'augmentation de *Pinus strobus*. On constate également une discontinuité pour plusieurs taxons tels que *Thuja/Juniperus*, *Abies balsamea*, *Tsuga canadensis* et *Acer saccharum*. Le %MO décrit durant cette période une augmentation graduelle alors que la fréquence des feux oscille autour de 4-5 feux/1000 ans.

Durant la zone III, nous pouvons principalement constater une réapparition de *Betula* sp., *Picea mariana* mais également un retour d'*Acer saccharum*, *Larix*, *Tsuga canadensis* vers 6000 cal. BP. Vers 4500 cal. BP, nous pouvons noter une augmentation d'*Acer saccharum* qui atteint alors son maximum vers 3000 cal. BP. Durant cette période, le %MO décrit encore une hausse et se stabilise entre 30 et 60 % jusqu'à nos jours. Le f_{surf} et le $f_{\#}$ oscillent toujours entre 4-5 feux/1000 ans jusque vers 3000 cal. BP où nous pouvons noter une baisse du $f_{\#}$ à 2,5 feux/1000 ans et une hausse du f_{surf} à 6 feux/1000 ans.

3.3.3 Lac Labelle

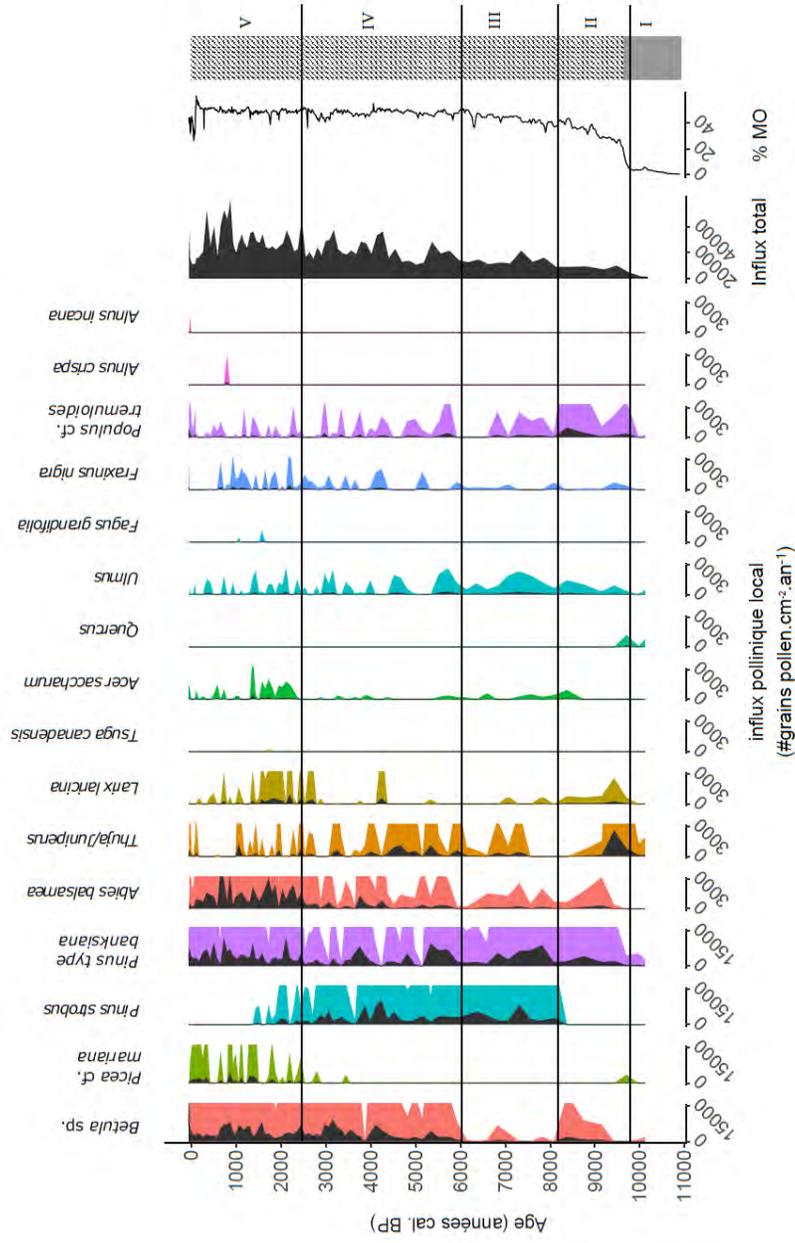


Figure 3.7 : Diagramme pollinique simplifié du lac Labelle. Les influx polliniques locaux sont des valeurs corrigées après l'application des seuils de présence/absence. Le diagramme complet est disponible en annexe (Annexe C). Les chiffres romains (I, II, III, IV, V) réfèrent aux zones polliniques. %MO = pourcentage de matière organique déterminé par la perte au feu. Le log stratigraphique indique en gris les sédiments silto-argileux et le motif texturé représente les sédiments organiques de type *gyttja*.

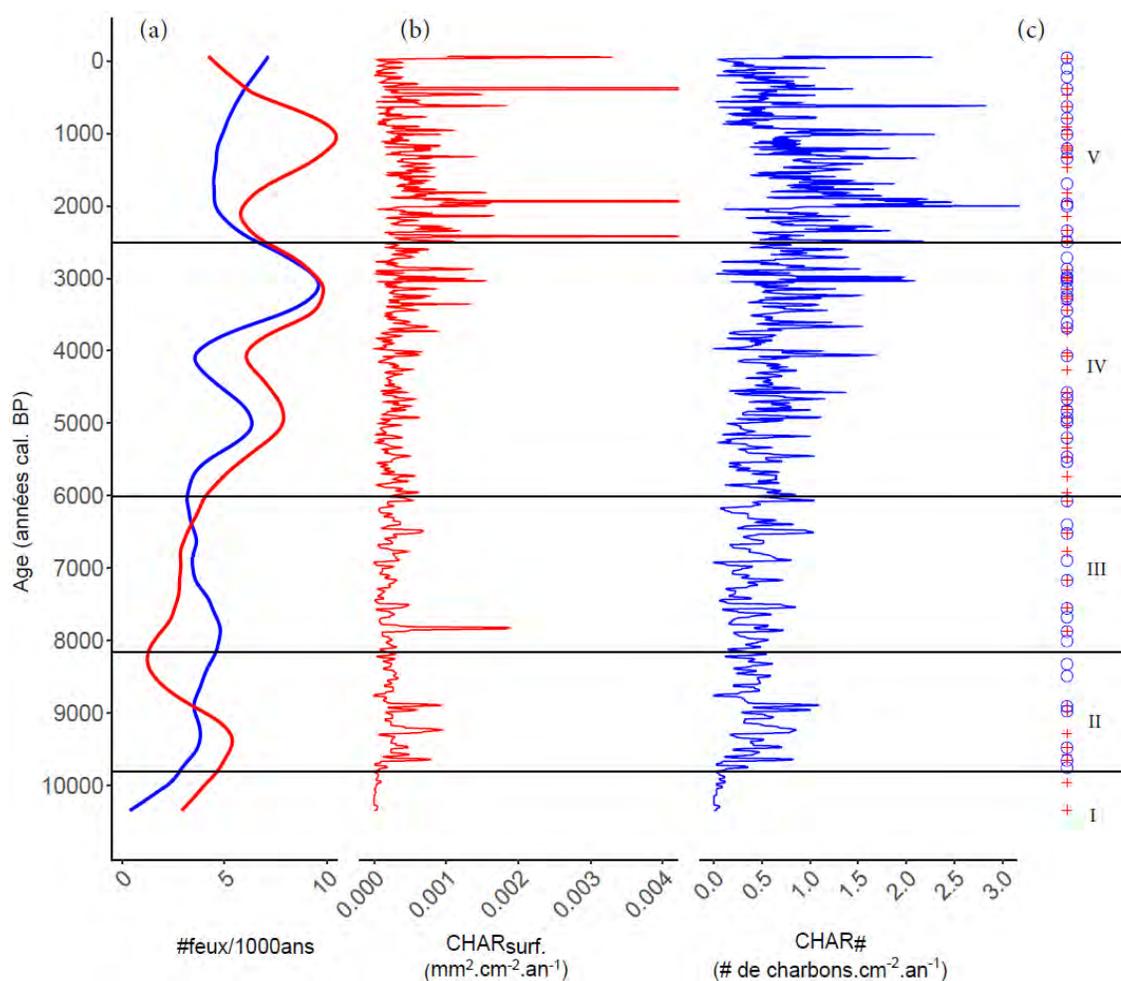


Figure 3.8 : Accumulation de charbons de bois macroscopiques ($\geq 150 \mu\text{m}$) et historique des feux du lac Labelle. (a) Fréquences des feux. Rouge = Fréquence des feux issue du $\text{CHAR}_{\text{surf}}$ (f_{surf}). Bleu = Fréquence des feux issue du $\text{CHAR}_{\#}$ ($f_{\#}$). (b) *Charcoal accumulation rate* de la surface (rouge = $\text{CHAR}_{\text{surf}}$) et du nombre (bleu = $\text{CHAR}_{\#}$) des charbons. (c) Événements de feux détectés par CharAnalysis. Signe positif rouge = événements de feux détectés par l'analyse du $\text{CHAR}_{\text{surf}}$. Rond bleu = événements de feux détectés par l'analyse du $\text{CHAR}_{\#}$.

De 10 200 à 9800 cal. BP (zone I), l'influx pollinique total, le $\text{CHAR}_{\text{surf}}$ et le $\text{CHAR}_{\#}$ et le % de matière organique (%MO) présentent des valeurs minimales. Ce n'est que durant la zone II, vers 9800 cal. BP, que nous pouvons constater l'apparition de *Pinus* type *banksiana*, de *Thuja/Juniperus* et de *Populus* cf. *tremuloides*, ainsi qu'une augmentation de l'influx pollinique total. On note également à partir de cette date une hausse rapide du %MO, de l'accumulation de charbons et de la fréquence des feux.

À partir de 9000 cal. BP, la zone II est caractérisée par une importante diminution de *Thuja/Juniperus*, et une augmentation de *Pinus* type *banksiana*, et de *Populus* cf. *tremuloides*. Le $CHAR_{surf}$, le $CHAR_{\#}$, le f_{surf} décrivent également une baisse importante alors que le $f_{\#}$ demeure pour sa part relativement stable. Vers 8300 cal. BP, nous pouvons également constater la présence mineure d'*Acer saccharum*.

La zone III, de 8100 à 6000 cal. BP, est marquée dès 8100 cal. BP par l'augmentation de *Pinus banksiana*, l'apparition de *Pinus strobus* et la diminution de *Populus* cf. *tremuloides* et de *Betula* sp. Nous pouvons encore noter durant cette période une présence mineure d'*Acer saccharum*. Le $f_{\#}$ demeure stable à 4,5 feux/1000ans durant cette période alors que le f_{surf} décrit une augmentation passant de 2 feux/1000ans à 5,5 feux/1000 ans entre 8100 et 6000 cal. BP.

La zone IV, de 6000 à 2500 cal. BP, est principalement caractérisée par une réapparition de *Betula* sp. et une augmentation de *Thuja/Juniperus* vers 6000 cal. BP. *Acer saccharum* présente pour sa part une faible abondance et une importante discontinuité durant cette période. La fréquence des feux décrit d'importante variation, oscillant entre 4,5 feux/1000 ans, vers 6000 cal. BP, et 8 feux/1000 ans vers 3000 cal. BP.

La zone V, 2500 cal. BP à nos jours, est caractérisée par une diminution de *Pinus strobus*. Vers 2500 cal. BP, on constate également une augmentation d'*Abies balsamea*, de *Larix*, d'*Acer saccharum* et de *Picea mariana*. C'est durant cette période que les scénarios de fréquence des feux présentent une importante divergence avec un $f_{\#}$ à 4 feux/1000 ans et un f_{surf} qui atteint 10 feux/1000ans.

CHAPITRE IV DISCUSSION

Afin de répondre aux hypothèses formulées, cette discussion aborde dans un premier temps l'histoire holocène de la végétation et passe en revue chacune des principales phases végétales de chacun des sites. Une comparaison avec des travaux précédents pour la région d'étude est alors effectuée. Dans un deuxième temps, cette discussion traite de l'histoire holocène des feux et tente de reconstruire, à l'aide des espèces identifiées, l'évolution du régime des feux ayant affecté chaque site. Enfin, plusieurs points de discussion supplémentaires sont abordés, concernant notamment l'hypothèse de la boréalisation (Carcaillet et al., 2011), la divergence entre les scénarios $f_{\#}$ et f_{surf} , le lien entre les résultats holocènes et les états de référence et la comparaison entre les résultats du lac Chasseur et du site de Rémigny (Pilon et Payette, 2015).

4.1 Histoire holocène de la végétation

Cette étude a permis de reconstruire l'histoire holocène de la végétation pour trois sites d'études localisés dans l'ouest du Québec entre l'érablière à bouleau jaune et la sapinière à bouleau blanc. En outre, ces reconstructions ont permis de mettre en évidence des dates d'établissement local ainsi qu'une présence continue pour l'érable à sucre au site Fur dès 7800 cal. BP, 4000 cal. BP au site Chasseur et 2500 cal. BP au site Labelle. Cet établissement n'aura cependant été possible qu'après plusieurs phases d'évolution du paysage (Figure 4.1).

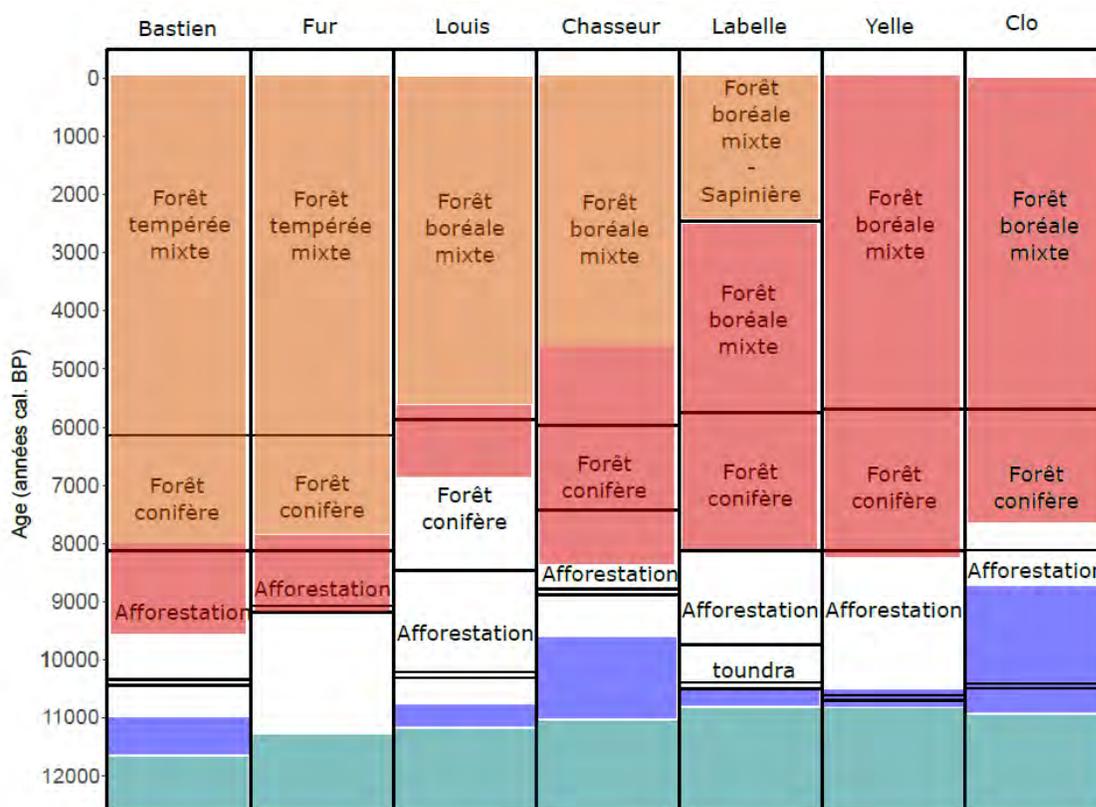


Figure 4.1 : Principales phases de végétation des sites à l'étude (Fur, Chasseur et Labelle) et des sites de travaux antérieurs : Lac Bastien (Bennett, 1987), Lac Louis (McAndrews, 1981), Lacs Yelle et Clo (Richard, 1980). Bleu clair = phase glaciaire. Bleu foncé = phase glacio-lacustre. Ligne double = bas de la séquence. Rouge = présence régionale d'*Acer saccharum*. Orange = présence locale d'*Acer saccharum*.

4.1.1 Déglaciation et retrait des lacs proglaciaires

Selon les reconstitutions de Dyke et al. (2005), la déglaciation s'est déroulée vers 11 000 cal. BP au site du lac Fur, puis vers 10 800 cal. BP au site Chasseur et 10 200 cal. BP au site Labelle. Suite au retrait de l'Inlandsis, les sites ont été submergés par le lac proglaciaire Ojibway au site Labelle et Barlow au site Chasseur. Selon Veillette (1996), le site Fur se situerait dans la zone limite du lac Barlow. L'absence d'indices biologiques de submersion à proximité du lac Fur et ce à des altitudes inférieures, suggère que celui-ci n'a probablement jamais été submergé par le lac proglaciaire Barlow. Cela permettrait

d'expliquer l'absence de sédiments glacio-lacustres dans la partie basale de la carotte extraite au lac Fur. Par la suite, le retrait du lac Barlow se serait déroulé entre 10 200 et 9200 cal. BP au site Chasseur et le retrait du lac Ojibway se serait déroulé vers 10 500 cal. BP au site Labelle (Veillette, 1988, 1994). Parmi les trois sites, seul le site Labelle présente une transition sédimentaire silt-argile/gyttja permettant d'identifier la date du retrait du lac Ojibway. Cette transition datée à 10 200 cal. BP corrobore les reconstitutions déjà établies (Veillette, 1994) ainsi que les résultats obtenus pour le lac Yelle par Richard (1980).

4.1.2 Phase de toundra et d'afforestation

Le retrait de l'Inlandsis puis des lacs proglaciaires Barlow et Ojibway a alors permis une première colonisation végétale des sites avec tout d'abord une phase de toundra. Seul le site Labelle présente cette phase. Celle-ci se déroule de 10 200 à 9800 cal. BP et est décrite par un influx pollinique total, un %MO et une accumulation de charbons de bois tous très faibles (figures 3.7 et 3.8).

La colonisation végétale s'est ensuite poursuivie durant la phase d'afforestation avec l'établissement d'espèces arbustives et arborescentes. Cette phase est alors décrite par une augmentation du %MO, de l'influx pollinique total et par la présence d'arbustes héliophiles tels que *Betula cf. glandulosa* et *cf.* ainsi que des espèces arborescentes comme le *Populus cf. tremuloides* et le *Picea mariana*.

L'absence d'une transition toundra/afforestation ne nous permet pas d'estimer l'âge du début de l'afforestation pour les sites Fur et Chasseur. L'afforestation du site Fur aurait donc débutée entre la déglaciation vers 11 000 cal. BP et 9200 cal. BP (date basale du site). Selon le diagramme pollinique du lac Fur (Figure 3.3), cette phase s'est poursuivie jusqu'à 8100 cal. BP et est décrite par une augmentation graduelle du %MO et une diminution de *Betula cf. glandulosa*. Cette diminution est également décrite par le diagramme pollinique du lac Bastien (Bennett, 1987) (carte : Figure 2.1 ; diagramme : Annexe D).

La phase d'afforestation aurait débuté au site Chasseur entre 10 200/9200 cal. BP et 8900 cal. BP (date basale du site). Selon le diagramme pollinique du lac Chasseur (Figure 3.5), elle s'est poursuivie jusqu'à 7500 cal. BP et est décrite par une augmentation du %MO et une diminution de *Betula cf. glandulosa* et du cf. *Juniperus*. Ces résultats sont légèrement décalés par rapport à ceux décrits par le diagramme du lac Louis (McAndrews, 1981) (carte : Figure 2.1 ; diagramme : Annexe E) où la phase d'afforestation semble se terminer vers 8000 cal. BP avec la hausse de *Pinus*.

Pour le site Labelle, la phase d'afforestation aurait débuté vers 9500 cal. BP avec une augmentation de *Betula cf. glandulosa*, du cf. *Juniperus*, de *Populus cf. tremuloides* et de *Pinus cf. banksiana*. Elle s'est poursuivie jusqu'à 8100 cal. BP alors qu'il est possible d'observer une diminution de *Betula cf. glandulosa*, du cf. *Juniperus* et de *Populus cf. tremuloides*. Le diagramme pollinique du lac Yelle (Richard, 1980) (carte : Figure 2.1 ; diagramme : Annexe F) livre également des résultats similaires avec une diminution de *Betula cf. glandulosa* vers 8000 cal. BP.

La phase d'afforestation serait également marquée par la présence d'*Acer saccharum* dès 8900 cal. BP au site Fur, 8600 cal. BP au site Chasseur et 8200 cal. BP au site Labelle (Figure 4.2). Cette présence locale de l'espèce avant 8000 cal. BP semble cependant être très précoce en comparaison aux interprétations émises par les auteurs pour la région (Richard, 1980, McAndrews, 1981, Bennett, 1987). Deux explications pourraient permettre de comprendre cet influx pollinique hâtif d'*Acer saccharum*. 1) Le seuil de présence locale (0,5% pour *Acer saccharum*) est trop faible pour la période d'afforestation. 2) L'érosion importante des sédiments glacio-lacustres chargés en pollen extra-régionaux aurait artificiellement augmenté l'apport pollinique d'espèces qui se situaient alors en bordure des lacs proglaciaires Ojibway-Barlow. Cette dernière hypothèse demanderait cependant à être testée dans des études ultérieures. Du fait de ces incertitudes, l'apport pollinique d'*Acer saccharum* durant la période d'afforestation sera ici considéré comme étant extrarégional pour chacun des sites.

Comme nous pouvons le constater, la fin de la phase d'afforestation, décrite principalement par une diminution des arbustes héliophyles (cf. *Juniperus* et *Betula cf. glandulosa*) et une augmentation rapide de *Pinus* (principalement *Pinus strobus*) se serait terminée de façon relativement synchrone aux sites Yelle, Labelle, Louis, Fur et Bastien (vers 8000 cal. BP). Cette synchronicité, également décrite par Blarquez et Aleman (2015), suggère alors que cette phase ne serait pas dépendante du temps depuis la libération des sites (déglaçage/exondation). Une augmentation abrupte des températures et des précipitations estivales et printanières moyennes dès 8000 cal. BP, telle que décrite par le modèle CCSM3 (Collins et al., 2006) (Figure 4.2), pourrait avoir entraîné une augmentation de la productivité végétale et donc une fermeture des écosystèmes forestiers. Cependant, la fin de la phase d'afforestation pour le site Chasseur se déroule 500 ans après les autres sites (voir Figure 4.1). Dans ce cas-ci, une phase d'afforestation plus longue pourrait notamment s'expliquer par la présence d'un mauvais drainage au site Chasseur causé par l'abondance des dépôts glacio-lacustres (silt-argile) empêchant ainsi la formation d'une forêt fermée.

4.1.3 Fermeture du couvert forestier

La phase d'afforestation s'ensuit d'une phase de densification du couvert forestier qui est attestée par une augmentation de l'influx pollinique total et par la diminution des espèces typiques des milieux ouverts, telles que *Betula cf. glandulosa* (Richard, 1977) et cf. *Juniperus* (Liu, 1990 ; Yu, 1997). Cette phase débute à partir de 8100 cal. BP au site Fur, 7500 cal. BP au site Chasseur et 8000 cal. BP au site Labelle et se termine vers 6000 cal. BP pour tous les sites. Cette phase est dominée dans un premier temps par *Pinus cf. banksiana*, *Pinus strobus* et *Populus cf. tremuloides*. Pour le site Fur, cette phase est marquée par l'apparition d'*Acer saccharum* (Figure 4.2). Un influx pollinique local et relativement continu suggère que l'espèce se serait maintenue depuis son installation vers 7800 cal. BP. Aux sites Chasseur et Labelle, l'influx pollinique d'*Acer saccharum*

demeure faible et discontinue durant cette période suggérant seulement une présence régionale de l'espèce telle que conclut par Richard (1980).

4.1.4 Formation d'une forêt mixte

Suite à la densification du couvert forestier, nous pouvons ensuite constater de manière quasi synchrone pour tous les sites de la région (Fur, Bastien, Louis, Chasseur, Labelle, Clo, Yelle) une augmentation de *Betula* vers 6000 cal. BP. L'augmentation de la proportion des feuillus marque alors la transition d'une forêt dominée par les conifères (*Pinus strobus* et *Pinus banksiana*) vers une forêt mixte. Pour les sites Fur (Figure 3.3) et Bastien (Annexe D), nous pouvons alors constater une diminution graduelle du genre *Pinus* durant l'Holocène et d'une augmentation de l'abondance d'*Acer saccharum* vers 5200 cal. BP. Un influx pollinique local et continu d'*Acer saccharum* permet d'attester de la présence locale de l'espèce à partir de 4000 cal. BP au site Chasseur et 2500 cal. BP au site Labelle (Figure 4.2). En comparaison avec les autres sites d'études de la région, *Acer saccharum* serait présent localement depuis 5500 cal. BP au lac Louis (Annexe E), et seulement régionalement aux lacs Yelle et Clo (Richard, 1980) depuis 8000 cal. BP. En effet, un influx pollinique faible et discontinu pour *Acer saccharum* à ces deux derniers sites ne permet pas de conclure sur une présence locale (Richard, 1980).

À partir de 2500 cal. BP, le site du lac Labelle est marqué par l'établissement d'*Acer saccharum* mais également par la chute de *Pinus strobus*, l'augmentation de *Picea mariana*, d'*Abies balsamea* et de *Pinus banksiana*. D'après Carcaillet et al. (2011), l'augmentation de ces trois dernières espèces depuis 2000 cal. BP correspond à une « boréalisation » de la forêt boréale mixte. Cependant, la présence d'*Abies balsamea* et d'*Acer saccharum* durant cette période au lac Labelle semble contredire cette hypothèse. En outre, il est également possible que le pollen de *Pinus banksiana* corresponde en réalité à *Pinus resinosa*, dont l'écologie favorise davantage des feux de surface fréquents (Bergeron et Brisson, 1990, Engstrom et Mann, 1991).

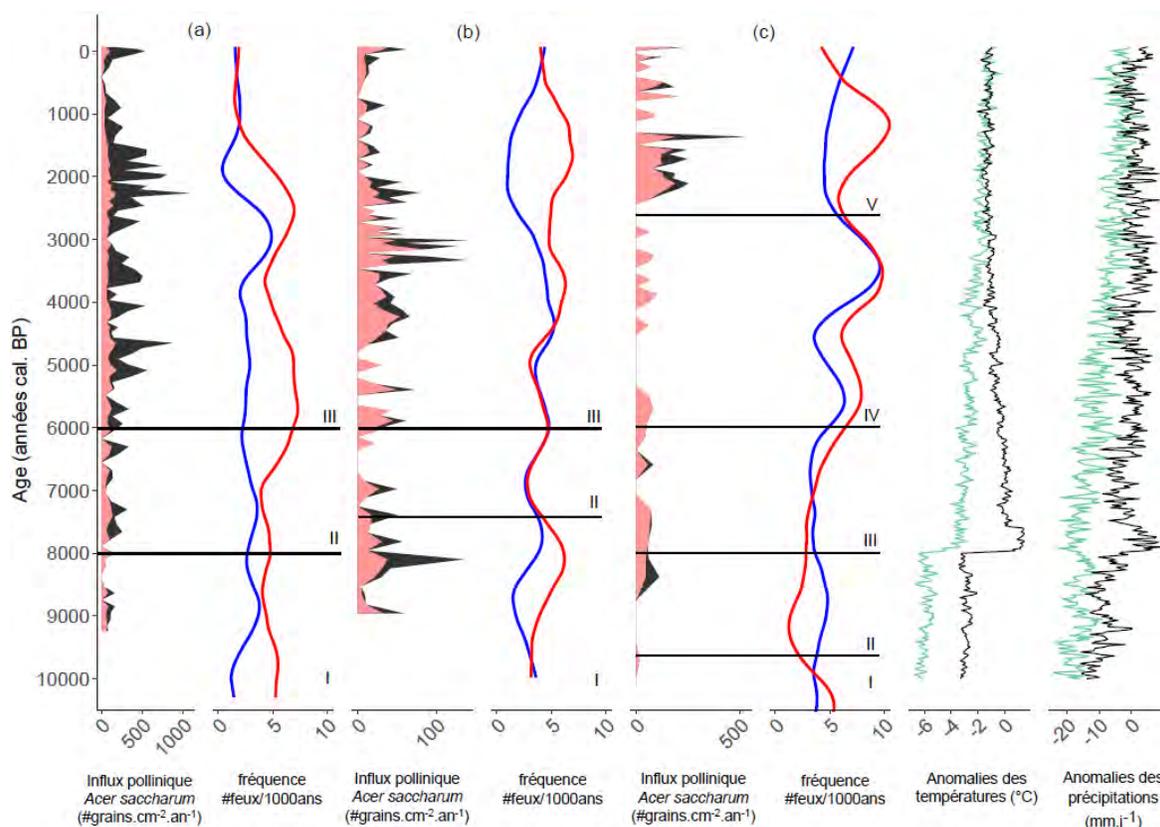


Figure 4.2 : Évolution de l'influx pollinique d'*Acer saccharum*, de la fréquence des feux (bleu= $f_{\#}$, rouge= f_{surf}) et du climat. (a) Site Fur, (b) Site Chasseur, (c) Site Labelle. Influx pollinique *Acer saccharum* : rose = seuil de l'influx pollinique d'*Acer saccharum* (influx pollinique régional), noir = Influx pollinique local d'*Acer saccharum*. Anomalies des températures et des précipitations (CCSM3) : vert = printemps, noir = été.

4.2 Histoire holocène des feux

L'histoire holocène des feux est décrite dans cette étude par deux scénarios de fréquence des feux ($f_{\#}$ et f_{surf}). Cependant, une divergence entre ces scénarios peut être notée, et ce particulièrement pour le site Fur où la différence est statistiquement significative (Tableau 3.1). De manière générale, cette différence peut être attribuée à la méthode utilisée par CharAnalysis pour détecter des événements de feux. Cette méthode repose en grande partie sur la différenciation entre la composante basse fréquence (bruit) et la composante haute fréquence (pic) d'un signal de charbon (Higuera et al. 2009). Plus ces deux composantes

différent, plus les méthodes de traitement du signal seront en mesure d'isoler les pics et d'identifier les événements de feux. De par la nature du signal, ces deux composantes sont pour le CHAR_# moins différenciées que pour le CHAR_{surf}. Certains événements sont donc détectés par le CHAR_{surf} mais pas par le CHAR_#. Néanmoins, la différence entre les scénarios de fréquence des feux pour les sites Chasseur et Labelle est non-significative. Ces résultats viennent donc appuyer les conclusions d'Ali et al. (2009) qui ont également mis en évidence une absence de différence significative entre les temps de retour des feux issus du CHAR_# et du CHAR_{surf} dans la forêt boréale mixte. Les résultats du lac Fur viennent pour leur part contredire ces conclusions.

Pour expliquer ces résultats contradictoires, deux hypothèses peuvent être formulées : 1) Les feux sévères dans la forêt boréale mixte permettent de produire une quantité et une surface de charbons importantes et donc d'obtenir des composantes hautes fréquences et basse fréquence bien différenciées autant pour le CHAR_# que pour le CHAR_{surf}. 2) Les feux peu sévères dans la forêt tempérée affectent des petites surfaces de façon plus récurrente et ne produisent pas de pics importants, les deux composantes sont donc trop peu différenciées, et ce particulièrement pour le CHAR_#. Une étude se concentrant sur la comparaison entre les deux proxys, et ce au sein d'écosystèmes affectés par différents régimes de feux serait cependant nécessaire afin de tester ces hypothèses.

Pour tester les hypothèses énoncées en introduction, il est nécessaire d'identifier la sévérité des feux. Ali et al. (2012) ont proposé le *FSI (Fire Severity Index)* dont le calcul est basé sur le CHAR_{background} et la fréquence des feux. Cet indice, dont les résultats semblent très convaincants (Rémy et al., 2017), n'a cependant pas été calculé dans cette étude. En effet, le $f_{\#}$ et le f_{surf} varient grandement (Tableau 3.1), ce qui aurait alors affecté les résultats d'un tel indice. Le climat et le type de combustible sont considérés comme les principaux facteurs pouvant faire varier la sévérité des feux au cours du temps (Estes et al., 2017 ; Lecomte et al., 2006). Bien que l'on suppose que le climat ait une influence majeure sur le régime des feux (Ali et al., 2012 ; Blarquez et al., 2015 ; Girardin et al., 2013, Drobyshev et al., 2014), les données climatiques présentées par cette étude (Figure 4.2) ne permettent

pas de déduire la sévérité des feux. Celle-ci sera donc identifiée en se basant sur l'écologie des principales espèces composant le spectre pollinique.

De par sa situation géographique, le cas du site Fur est particulièrement intéressant puisque ce dernier a connu au cours de l'Holocène, une transition d'une forêt dominée par les conifères vers une forêt dominée par les feuillus (Figure 3.3). Ainsi, la diminution du CHAR observée à partir de 8000 cal. BP semble avoir été causée par une diminution du *Pinus banksiana* et donc d'un changement de combustible. Ces observations, appuyées par des coefficients de corrélation de spearman élevés (Annexe H), viennent soutenir les conclusions de plusieurs études mettant en lumière l'importance de la composition forestière, et donc le type de combustible, sur la biomasse brûlée (Blarquez et al., 2015) ainsi que sur la fréquence des feux (Higuera et al., 2009 ; Girardin et al., 2013). De 9000 à 8000 cal. BP, les feux qui ont affecté le site Fur étaient donc vraisemblablement sévères.

De 8000 à 6000 cal. BP, la fréquence des feux est relativement stable pour l'ensemble des sites (Figure 3.4, 3.6 et 3.8). Cette fréquence qui oscille entre 4-5 feux/1000 ans aurait alors permis l'établissement et le maintien de *Pinus strobus* durant cette période ainsi que d'*Acer saccharum* au site Fur dès 7800 cal. BP. La présence importante de *Pinus strobus* durant cette période suggère une diminution de la sévérité des feux à partir de 8000 cal. BP (Engelmark et al., 2000).

À partir de 6000 cal. BP, il est ensuite possible de constater une augmentation du f_{surf} au site Fur et du $f_{\#}$ et f_{surf} au site Labelle. Cette augmentation de fréquence coïncide avec l'apparition de *Betula cf. papyrifera*. Une augmentation de la fréquence des feux aurait alors potentiellement causé la diminution de *Pinus strobus* tout en favorisant l'augmentation de *Betula*. Les coefficients de corrélation (Annexe H et J) viennent d'ailleurs appuyer le lien existant entre la fréquence des feux et *Betula* ($r=0.7$ site Fur ; $r=0.63$ site Labelle). La hausse de *Betula* à cette période aurait alors permis une transition vers une forêt mélangée. Tel que décrit par Hély et al. (2010) et Bergeron et al. (2004), la forêt mélangée est principalement affectée par des feux de faible surface, d'une intensité

moyenne. L'augmentation de *Betula* (principalement *Betula papyrifera*) se serait alors rapidement traduite par une baisse de la sévérité. Cette modification du régime de feu aurait alors possiblement permis l'augmentation d'*Acer saccharum* vers 5200 cal. BP au site Fur. En limite d'aire de répartition la séquence : hausse de *Betula* - baisse de la sévérité des feux - augmentation d'*Acer saccharum*, ne s'est pas déroulée aussi rapidement qu'au site Fur. Il faudra attendre 4000 cal. BP pour observer l'établissement d'*Acer saccharum* au site Chasseur et 2500 cal. BP au site Labelle.

De 2500 cal. BP à nos jours, au site Labelle, le $f_{\#}$ et le f_{surf} décrivent une divergence. En nous basant sur les résultats polliniques et sur les deux scénarios de fréquence (Figure 4.2), nous pouvons supposer que 1) une diminution de la fréquence des feux a permis l'établissement local d'*Acer saccharum* vers 2500 cal. BP ; 2) une diminution d'*Acer saccharum* entre 1200 et 800 cal. BP a été causé par une augmentation de la fréquence (décrite seulement par le f_{surf}) ; 3) une nouvelle diminution de la fréquence a permis un retour d'*Acer saccharum* à partir de 800 cal. BP. Le f_{surf} de cette période serait donc le plus en mesure d'expliquer les variations d'*Acer saccharum*. Le retour d'*Acer saccharum* vers 800 cal. BP suggère soit que d'autres populations étaient présentes à proximité pour recoloniser le milieu, ou encore que les feux n'étaient pas assez sévères pour complètement faire disparaître l'érablière du lac Labelle. La première explication viendrait alors soutenir la conclusion de Graignic et al. (2018) et mettrait en évidence la capacité d'*Acer saccharum* à coloniser des milieux par un mécanisme de dispersion à longue distance (par saut). Cependant, la présence importante d'*Abies balsamea* depuis 2500 cal. BP au lac Labelle, dont la présence suggère que les feux étaient peu sévères (Ali et al., 2008), vient appuyer la deuxième explication. Un comptage pollinique plus important (>500 pollen) aurait alors éventuellement permis d'identifier une survie locale d'*Acer saccharum* durant la période 1200-800 cal. BP.

4.3 Comparaison des résultats provenant des sédiments lacustres et de la pédoanthracologie, cas du lac Chasseur

À environ 800 m du site Chasseur se trouve le site d'étude de Rémigny de Pilon et Payette (2015) (Figure 2.1). La proximité des deux sites nous permet alors de comparer leurs historiques des feux. Parmi les 21 feux détectés (scénario maximal) par Pilon et Payette (2015), 15 feux ont été détectés par CHAR_{surf.} et 9 par le CHAR_# (Figure 3.6). Plusieurs divergences peuvent cependant être notées : 1) Huit événements de feux sont identifiés pour le site de Rémigny contre 4-5 pour le site Chasseur pour les 1000 dernières années. 2) Aucun feu n'est enregistré de 5500 à 3500 cal. BP (Rémigny), alors que 9 feux sont identifiés pour le site Chasseur durant cette période. 3) Le feu le plus ancien est daté à 7200 cal. BP au site de Rémigny alors que plusieurs pics de CHAR sont identifiables depuis au moins 9000 cal. BP pour le site Chasseur. Plusieurs hypothèses pourraient expliquer ces différences.

1) En se basant sur la datation de charbons de bois pour identifier et dater des événements de feux locaux, la pédoanthracologie part du postulat que tous les charbons issus d'un feu possèdent des âges relativement similaires. Cependant, l'âge du combustible présent dans une forêt avant un feu peut grandement varier en raison du bois mort créé naturellement par le vieillissement de la forêt ainsi que des arbres tués lors d'une séquence de feux et dont la transformation du bois en matière organique n'est pas terminée. Sur un même site, des charbons peuvent avoir quelques centaines d'années de différence. Cette problématique, aussi nommé "*old wood effect*" (Waterbolk 1971) pourrait expliquer le nombre de feux élevé identifié par Pilon et Payette (2015) durant les 1000 dernières années.

2) Ensuite, bien que les deux sites soient très proches, un réseau de lacs les sépare créant ainsi une barrière à la propagation du feu. Un feu ayant affecté le site Chasseur peut très bien ne pas avoir affecté le site de Rémigny du fait de la présence de ces barrières. En outre, les événements de feu détectés par CharAnalysis peuvent alors eu lieu dans un rayon de 10-30km (Oris et al., 2014) autour du lac et donc n'avoir affecté ni le site de Rémigny, ni

le site Chasseur (Higuera et al., 2009). Il est alors possible que des feux étant enregistrés par le site Chasseur ne soient pas enregistrés par le site de Rémigny.

Cependant, il semble peu probable que le site de Rémigny n'ait connu aucun feu de 5500 à 3500 cal. BP alors que le site Chasseur en dénombre neuf et que durant cette période l'activité des feux semble être à son paroxysme, avec une variance plus importante du $\text{CHAR}_{\text{surf}}$ et du $\text{CHAR}_{\#}$ (Figure 3.6). Ainsi, soit cette différence est réellement due à une absence de feu de forêt durant cette période au site de Rémigny, soit la dégradation ou la combustion secondaire des charbons ont détruit toute trace de paléofeu (Ohlson, 2012, Pilon et Payette, 2015, Payette et al., 2012). 3) Des raisons similaires pourraient également expliquer l'absence de charbons entre la libération du site par le lac Barlow et 7200 cal. BP.

D'après Pilon et Payette (2015) et Graignic et al. (2018), les populations d'*Acer saccharum* au site de Rémigny seraient le résultat d'une installation récente de l'espèce. Les résultats polliniques du lac Chasseur ne viennent cependant pas appuyer cette conclusion. La divergence entre ces conclusions pourrait être expliquée par les différentes méthodes utilisées. En effet, l'analyse pollinique donne un aperçu de la végétation dans un rayon de 20 km (Davis et Jacobson, 1985) alors que la pédoanthracologie et l'analyse génétique sont des approches beaucoup plus locales (<1 km).

CHAPITRE V CONCLUSION GÉNÉRALE

L'histoire holocène de la végétation et des feux a été reconstituée dans trois érablières situées le long d'un gradient latitudinal dans l'ouest du Québec. Les analyses polliniques ont permis de distinguer trois grandes phases végétales. La première phase correspond à une période d'afforestation du milieu avec la présence d'une forêt boréale ouverte dominée par *Picea mariana*, *Pinus* type *banksiana*, *Populus* cf. *tremuloides*, cf. *Juniperus* et *Betula* cf. *glandulosa*. La deuxième phase se traduit par une fermeture de la canopée et débute de façon synchrone pour les trois sites. Cette synchronicité serait le résultat d'une augmentation des températures et des précipitations estivales et printanières vers 8000 cal. BP. Cette période est principalement dominée par *Pinus strobus*, *Pinus* type *banksiana* et cf. *Thuja occidentalis*. Enfin, la troisième phase est caractérisée par l'établissement de *Betula* (*Betula* cf. *papyrifera*), d'une diminution graduelle de *Pinus strobus* menant ainsi à la transformation d'une forêt dominée par les conifères vers une forêt boréale mixte. Une quatrième phase peut être notée pour le site Fur avec la mise en place de la forêt tempérée, dominée par des espèces de fins de successions telles qu'*Acer saccharum*, *Betula* (*Betula* cf. *alleghaniensis*) et cf. *Thuja occidentalis*. Cette succession végétale appuie les données palynologiques des études antérieures et permet une meilleure compréhension de la dynamique végétale holocène de la région d'étude.

L'historique des feux, reconstitué à l'aide de deux proxys (surface et nombre) et accompagné des analyses palynologiques a permis de caractériser les différents régimes de feu ayant affecté les trois sites. De 8000 à 6000 cal. BP, la dominance de *Pinus strobus* pour chacun des sites suggère un régime de feux fréquents mais de faible sévérité. Ainsi, cette faible sévérité aurait permis l'établissement d'*Acer saccharum* au site Fur vers 7800 cal. BP. À partir de 6000 cal. BP, l'augmentation de la fréquence des feux aurait ensuite favorisé le *Betula*. L'apparition de cette espèce dans le paysage

aurait permis de diminuer la combustibilité verticale et horizontale du paysage. Cette modification de la combustibilité du paysage aurait permis l'augmentation d'*Acer saccharum* vers 5200 cal. BP. Ce n'est qu'à partir de 4000 cal. BP pour le site Chasseur et 2500 cal. BP pour le site Labelle, qu'une baisse de la fréquence des feux aurait permis l'établissement local d'*Acer saccharum*. Pour le site Labelle, une baisse de la sévérité aurait par ailleurs permis l'augmentation d'*Abies balsamea* durant la même période.

Si selon Boisvert-Marsh et al. (2014), *Acer saccharum* est supposé connaître une augmentation de son aire de répartition au cours du prochain siècle en réponse aux changements climatiques, cette étude met en lumière l'importance de considérer également l'effet de l'augmentation des températures sur le régime des feux et plus particulièrement sur la sévérité. De nombreux travaux prévoient dans la zone d'étude une augmentation de la surface brûlée, de la sévérité et de la fréquence des feux (Wotton et al., 2017 ; DeGroot et al., 2013 ; Stocks et al., 1998), l'étude de Girardin et al. (2013) suggère également que l'augmentation des feuillus dans la forêt boréale (*Betula papyrifera* et *Populus*), et plus précisément dans la sapinière à bouleau blanc, pourrait entraîner une rétroaction négative suffisante pour diminuer la fréquence des feux. La capacité migratoire d'*Acer saccharum* dépendra alors majoritairement de l'importance de cette rétroaction négative et si les conditions le permettent, les populations du site Labelle et du site Chasseur joueront un rôle clé dans l'expansion de l'aire de répartition.

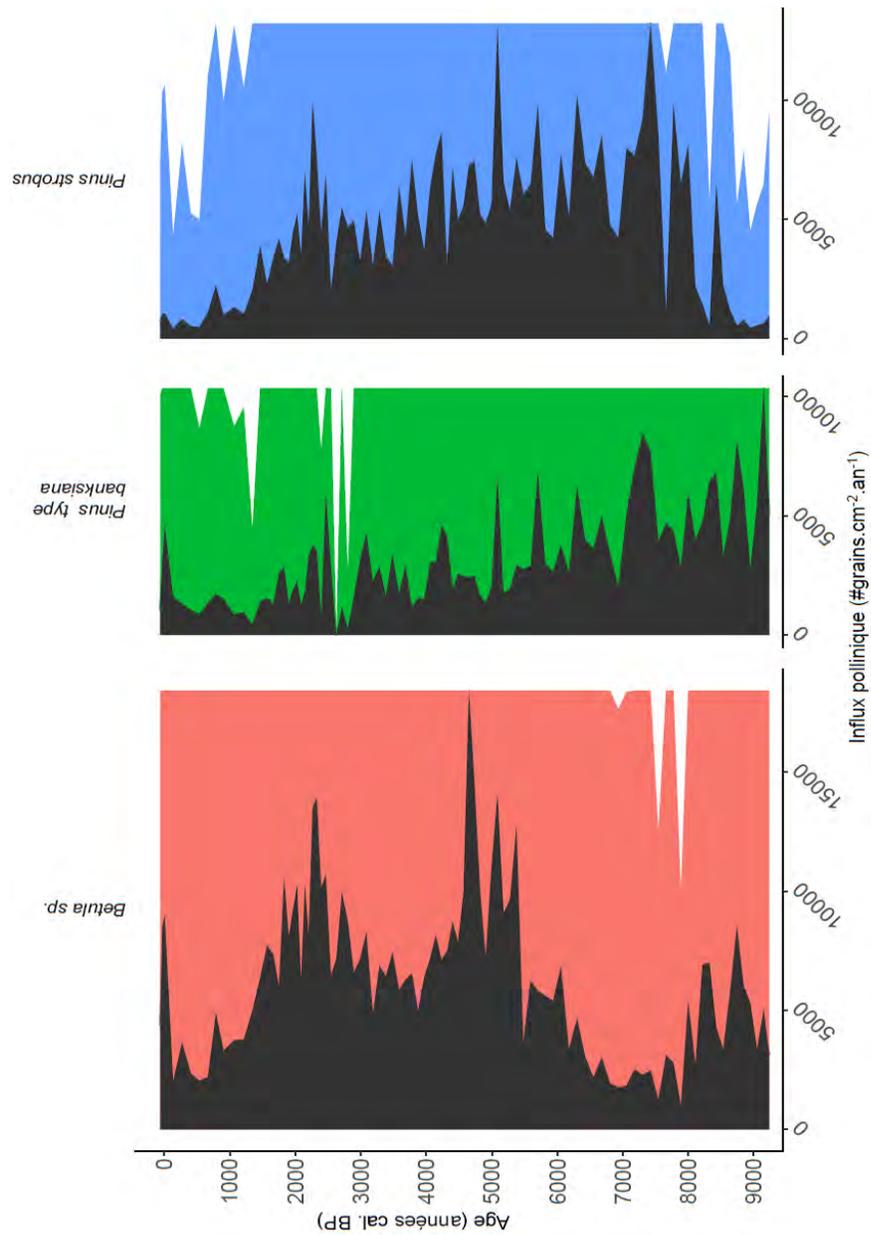
Cette étude s'est concentrée sur l'établissement d'*Acer saccharum* dans les sites en limites d'aire de répartition ainsi que sur le lien potentiel entre les feux et *Acer saccharum*. Dans le cadre d'études ultérieures sur la dynamique Holocène d'*Acer saccharum*, l'emphasis pourrait être mis sur la différenciation de certaines espèces clés, telles que *Pinus resinosa* et *Betula Alleghaniensis*, qui pourrait permettre d'identifier la sévérité des feux de manière plus précise. Dans le cas d'étude en limite d'aire de répartition, un comptage pollinique d'au moins 500 pollen serait également à

considérer. Enfin, d'autres types de perturbations pourraient avoir eu un impact sur la dynamique de la forêt boréale mixte et sur *Acer saccharum*. Une recherche incluant l'étude paléoécologique des épidémies d'insectes, notamment la tordeuse des bourgeons de l'épinette, pourrait permettre de mieux saisir la complexité de la dynamique forestière en forêt boréale mixte et éventuellement d'expliquer l'établissement et le maintien d'*Acer saccharum*.

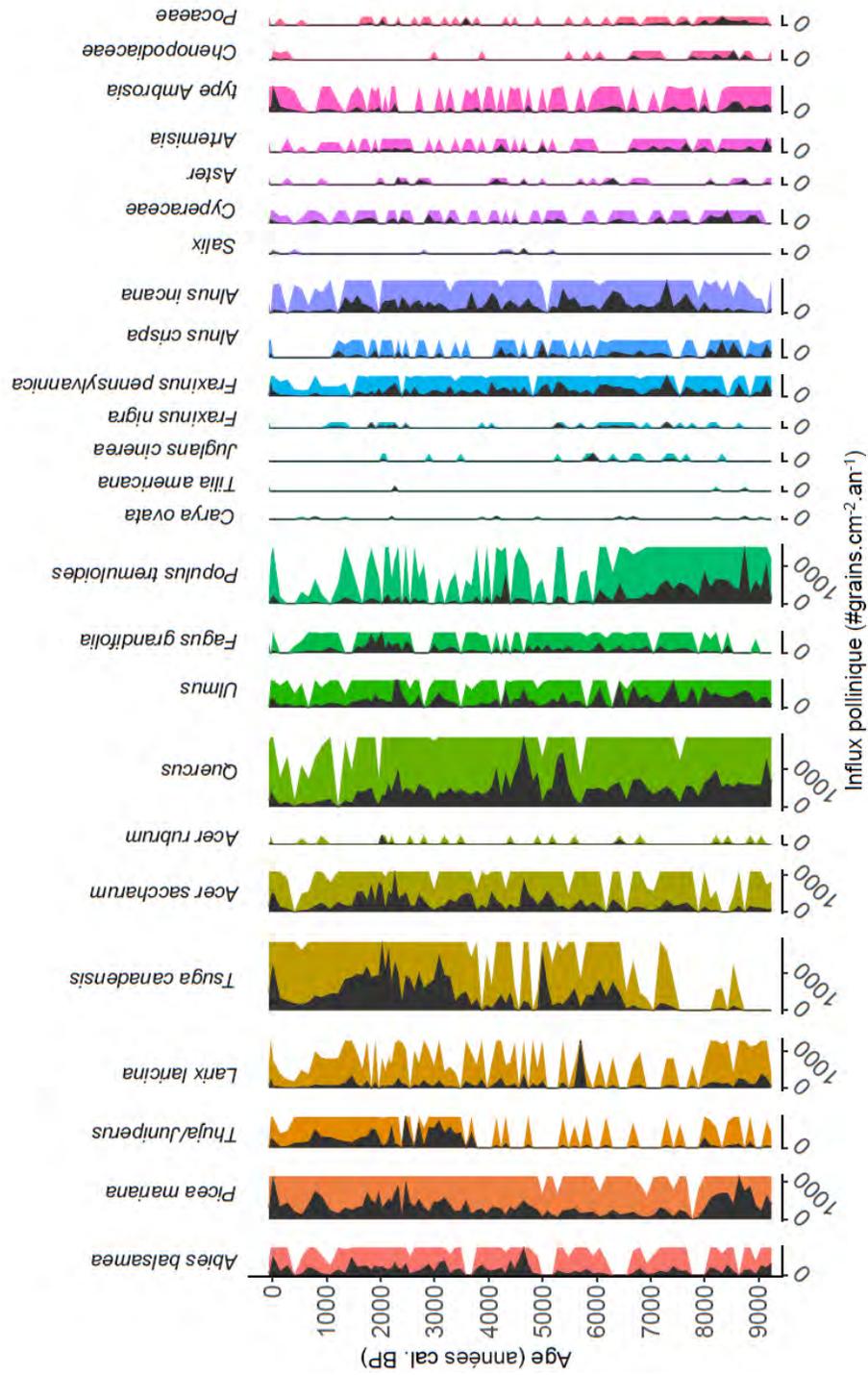
ANNEXES

ANNEXE A

DIAGRAMME POLLINIQUE DU LAC FUR PRÉSENTANT LES PRINCIPAUX TAXONS SANS APPLICATION DE SEUIL DE PRÉSENCE LOCALE.

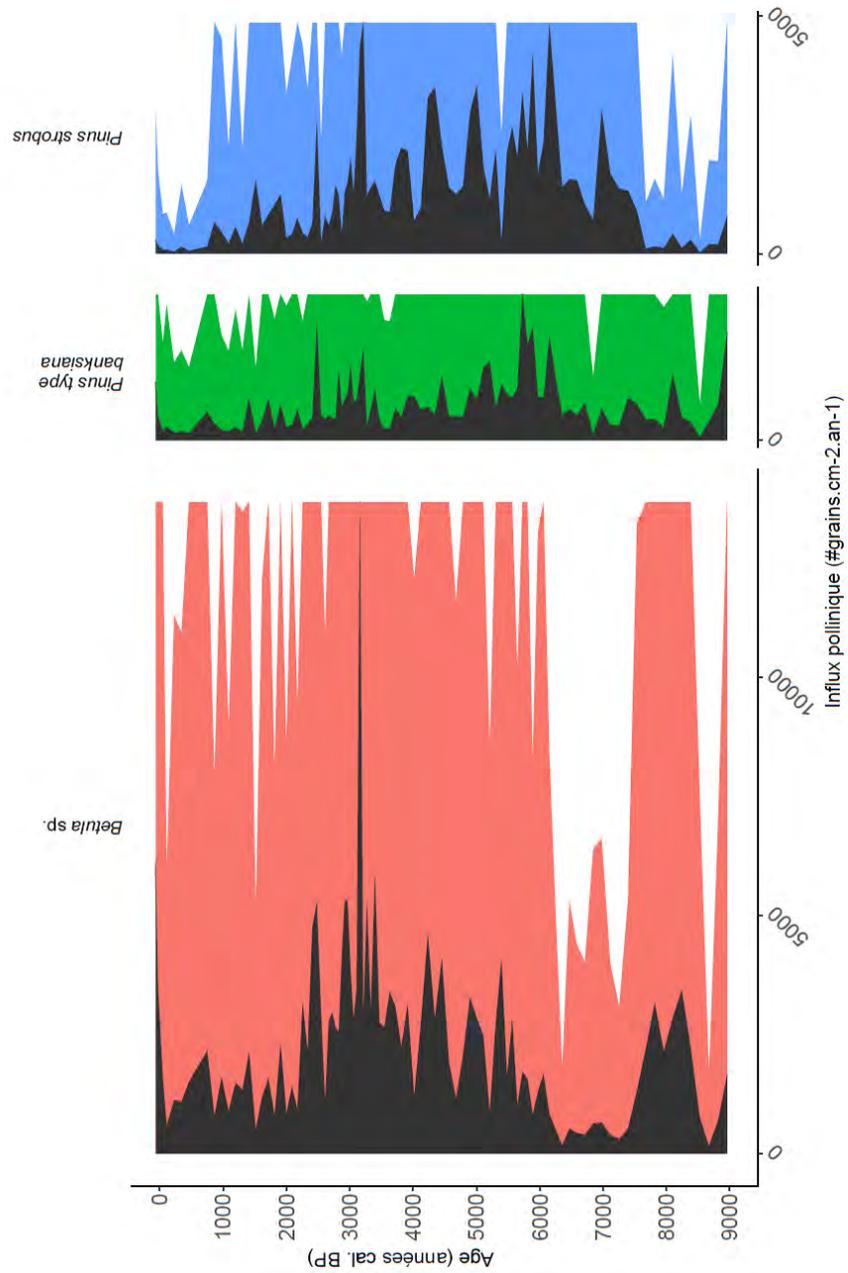


ANNEXE A.1 (SUITE)

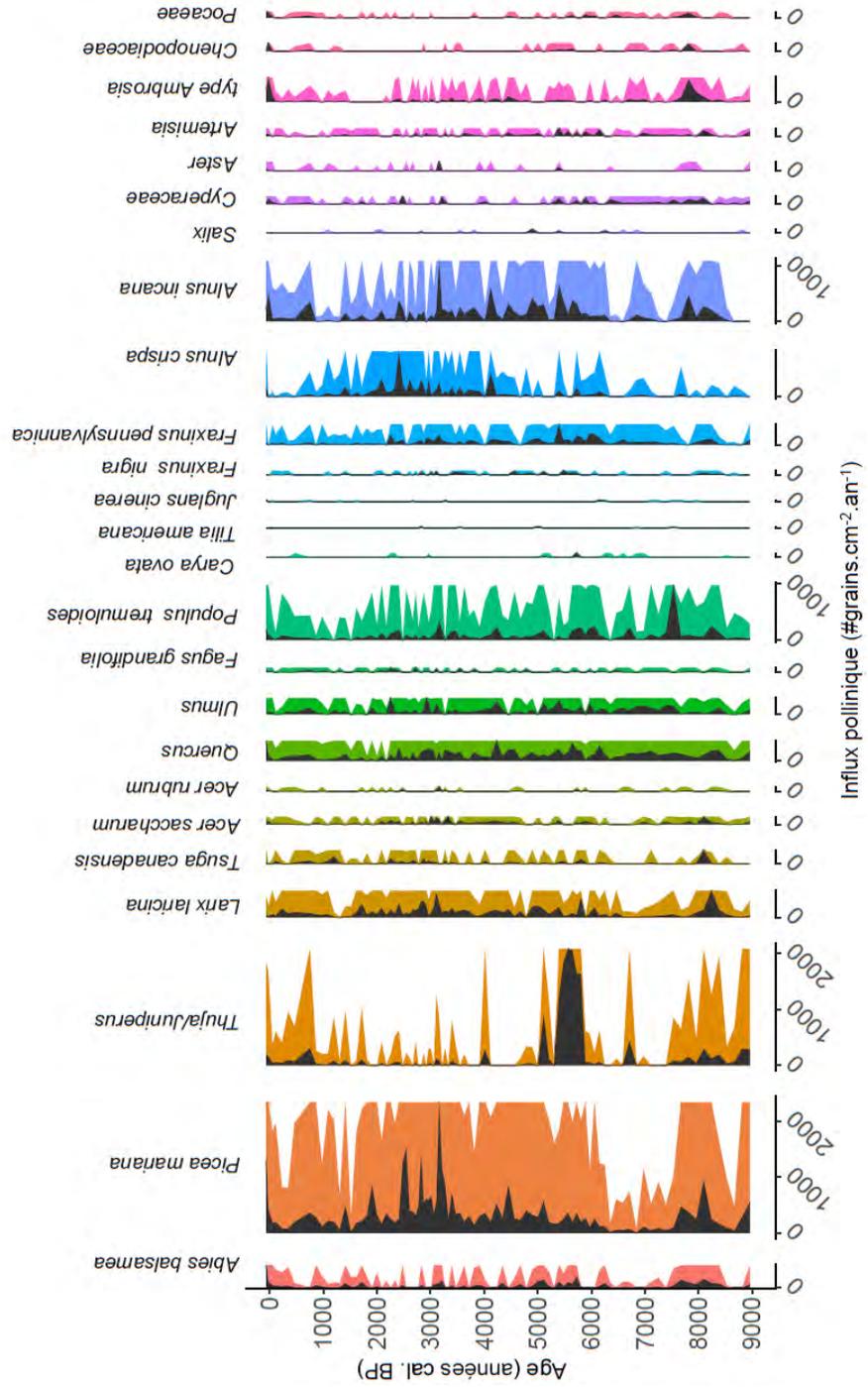


ANNEXE B

DIAGRAMME POLLINIQUE DU LAC CHASSEUR PRÉSENTANT LES PRINCIPAUX TAXONS SANS APPLICATION DE SEUIL DE PRÉSENCE LOCALE.

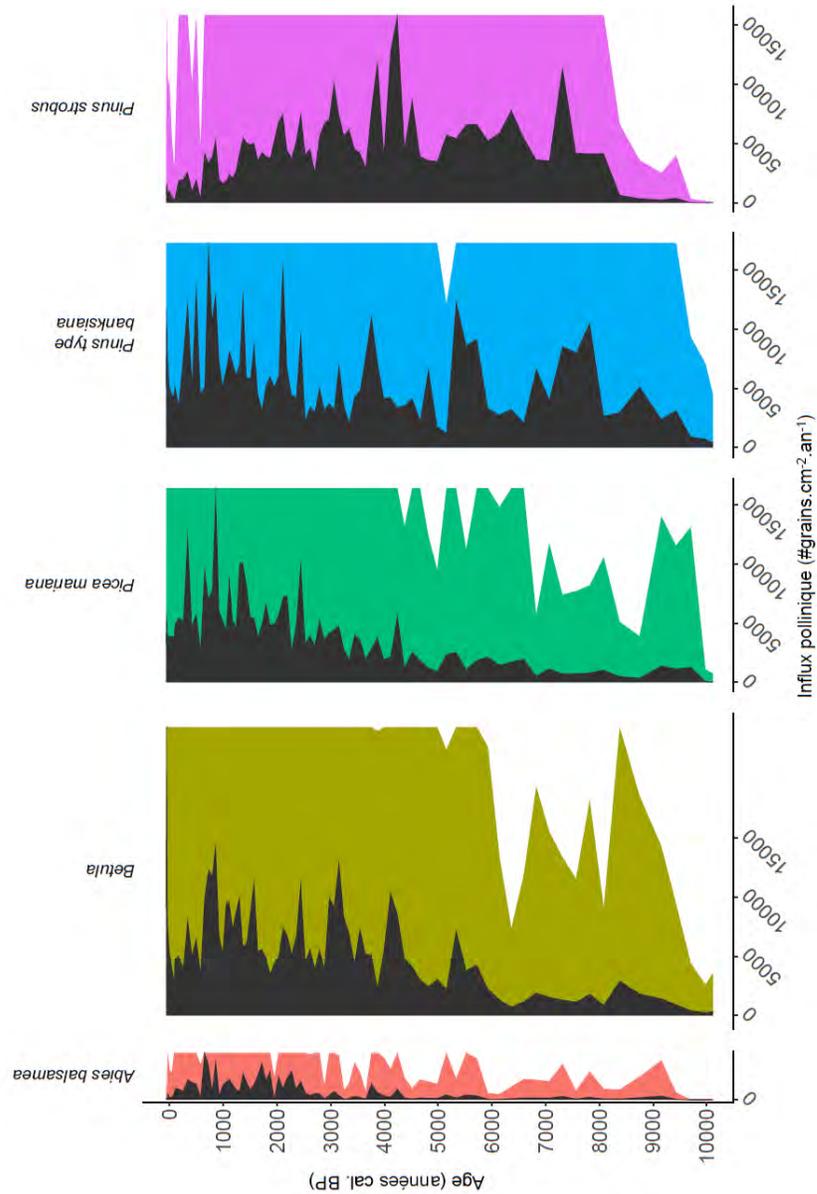


ANNEXE B.1 (SUITE)

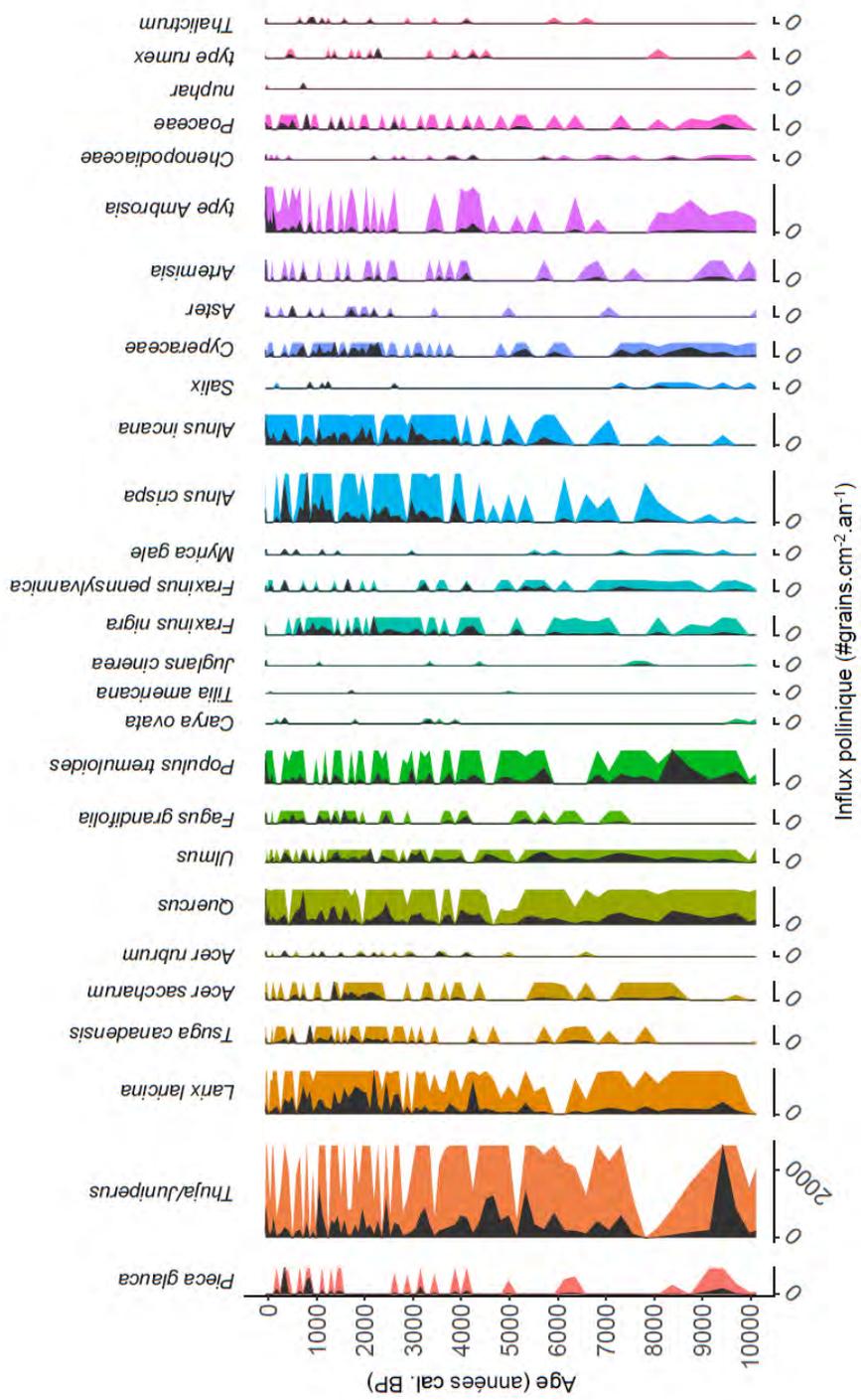


ANNEXE C

DIAGRAMME POLLINIQUE DU LAC LABELLE PRÉSENTANT LES PRINCIPAUX TAXONS SANS APPLICATION DE SEUIL DE PRÉSENCE LOCALE.

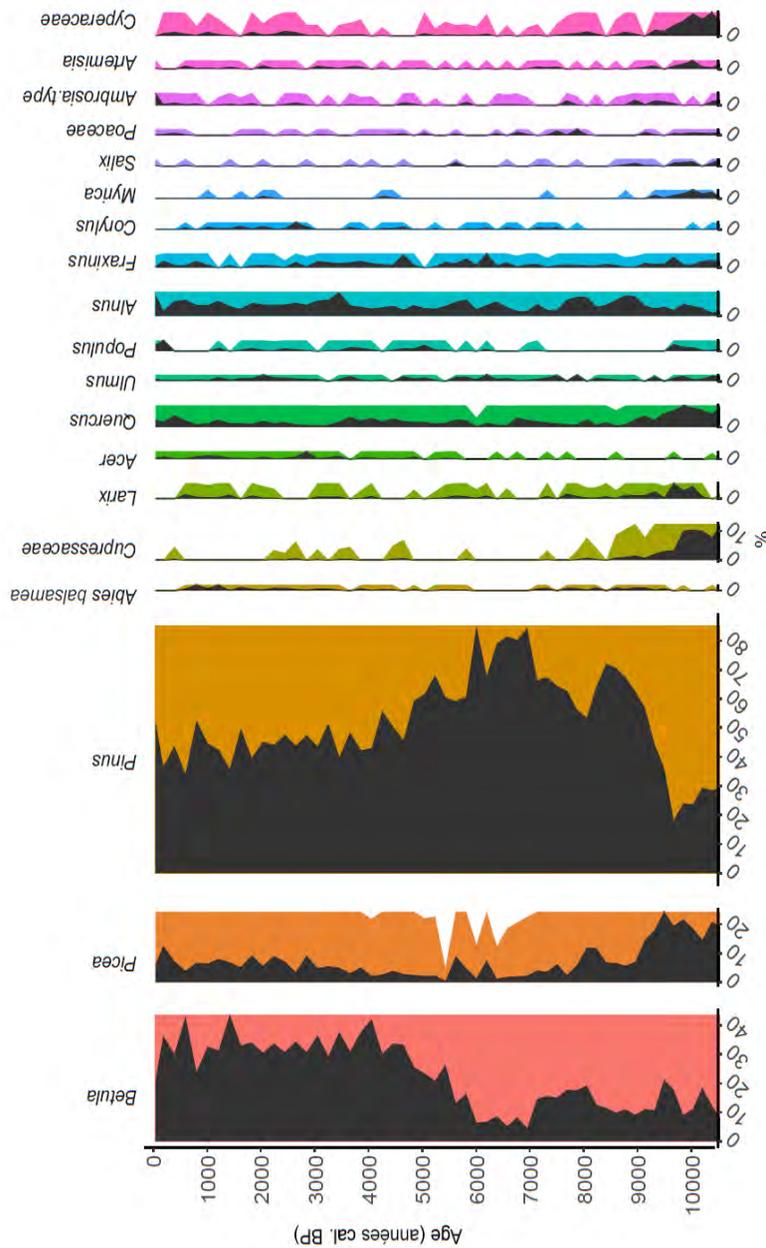


ANNEXE C.1 (SUITE)



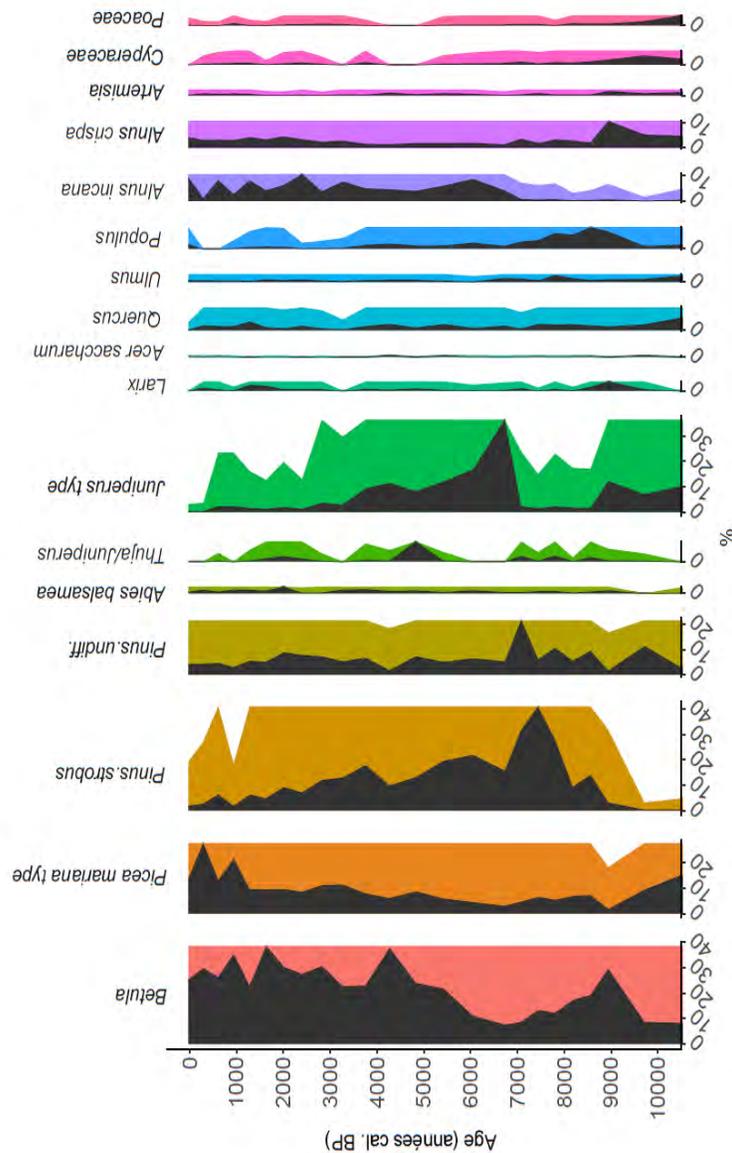
ANNEXE E

DIAGRAMME POLLINIQUE SIMPLIFIÉ DU LAC LOUIS (MCANDREWS, 1981)
PRÉSENTANT LA PROPORTION (%) DE CHAQUE TAXON DONT
L'ABONDANCE EST OU A ÉTÉ $\geq 2\%$. LES ÂGES PRÉSENTÉS SONT EN
ANNÉES BP CALIBRÉES.



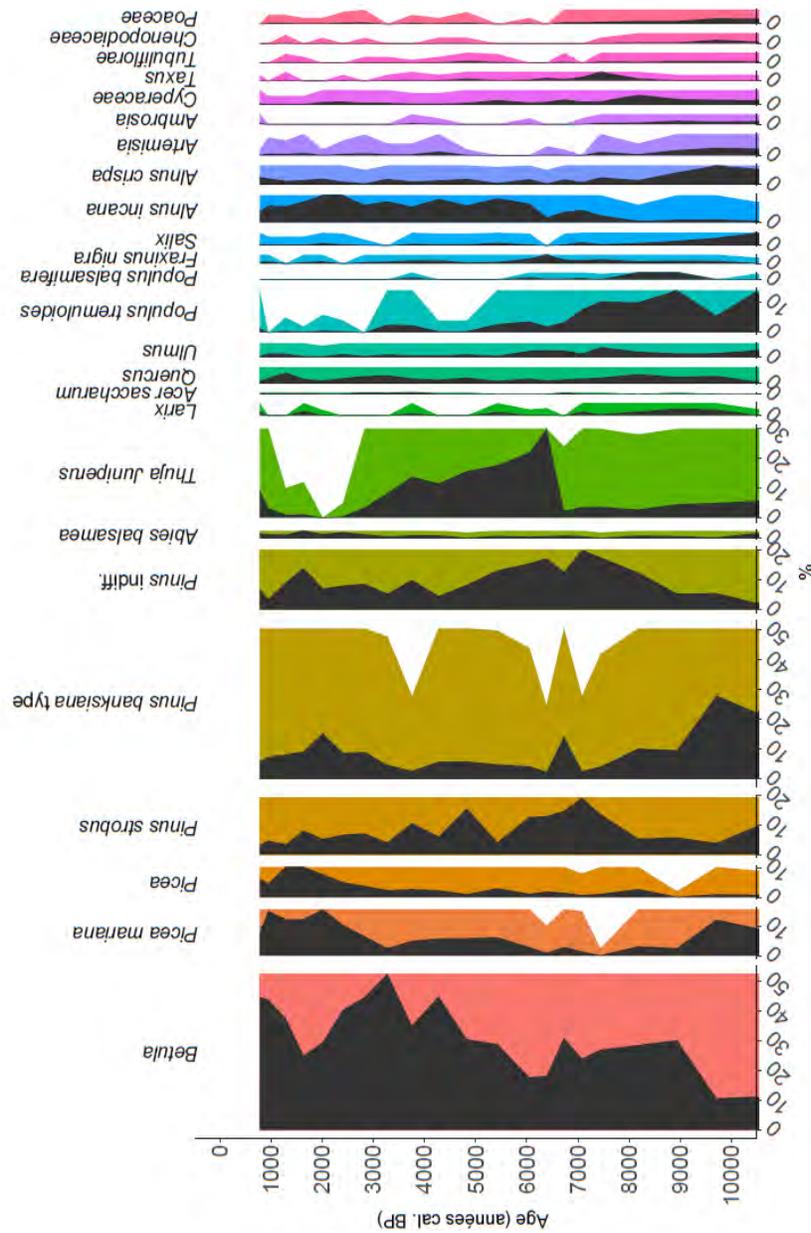
ANNEXE F

DIAGRAMME POLLINIQUE SIMPLIFIÉ DU LAC YELLE (RICHARD, 1980)
PRÉSENTANT LA PROPORTION (%) DE CHAQUE TAXON DONT
L'ABONDANCE EST OU A ÉTÉ $\geq 2\%$ (EXCEPTÉ *ACER SACCHARUM* DONT LE %
MAXIMUM ATTEINT 0.69 VERS 4250 CAL. BP). LES ÂGES PRÉSENTÉS SONT
EN ANNÉES BP CALIBRÉES.



ANNEXE G

DIAGRAMME POLLINIQUE SIMPLIFIÉ DU LAC CLO (RICHARD, 1980)
PRÉSENTANT LA PROPORTION (%) DE CHAQUE TAXON DONT
L'ABONDANCE EST OU A ÉTÉ $\geq 2\%$. LES ÂGES PRÉSENTÉS SONT EN
ANNÉES BP CALIBRÉES.



ANNEXE H

MATRICE DE CORRÉLATION DE SPEARMAN DU SITE FUR. ROUGE =
CORRÉLATION POSITIVE. BLEU = CORRÉLATION NÉGATIVE. X =
CORRÉLATION NON SIGNIFICATIVE.

f_{surf}	$f_{\#}$	CHAR _{surf}	CHAR _#	<i>Abies balsamea</i>	<i>Acer saccharum</i>	<i>Betula</i>	<i>Picea mariana</i>	<i>Pinus strobus</i>	<i>Pinus type banksiana</i>	<i>Thuja/Juniperus</i>	<i>Larix laricina</i>	<i>Tsuga canadensis</i>	<i>Quercus</i>	<i>Ulmus</i>	<i>Fagus grandifolia</i>	<i>Fraxinus nigra</i>	<i>Populus tremuloidea</i>	<i>Alnus crispa</i>	<i>Alnus incana</i>	
f_{surf}	1	X	0.23	0.47	X	0.34	0.7	0.6	0.37	X	-0.22	0.1	0.07	0.45	X	0.25	X	-0.07	0.1	0.25
$f_{\#}$	1	X	X	X	-0.1	-0.08	0.34	-0.07	0.51	0.22	-0.18	-0.09	-0.09	0.3	X	0.1	0.1	0.06	0.07	0.39
CHAR _{surf}	1	0.86	X	-0.3	-0.1	0.2	0.07	0.08	0.53	-0.44	0.02	-0.52	0.44	0.34	X	-0.3	0.06	0.53	0.28	X
CHAR _#	1	-0.07	-0.06	0.21	0.09	0.1	0.38	-0.39	0.05	-0.49	0.51	0.36	-0.09	0.08	0.51	0.23	X	X	X	

ANNEXE I

MATRICE DE CORRÉLATION DE SPEARMAN DU SITE CHASSEUR. ROUGE = CORRÉLATION POSITIVE. BLEU = CORRÉLATION NÉGATIVE. X = CORRÉLATION NON SIGNIFICATIVE.

	$f_{\text{surf.}}$	$f_{\#}$	CHAR _{surf.}	CHAR _#	<i>Abies balsamea</i>	<i>Acer saccharum</i>	<i>Betula</i>	<i>Picea mariana</i>	<i>Pinus strobus</i>	<i>Pinus type banksiana</i>	<i>Thuja/Juniperus</i>	<i>Larix laricina</i>	<i>Tsuga canadensis</i>	<i>Quercus</i>	<i>Ulmus</i>	<i>Fagus grandifolia</i>	<i>Fraxinus nigra</i>	<i>Populus tremuloides</i>	<i>Alnus crispa</i>	<i>Alnus incana</i>	
$f_{\text{surf.}}$	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
$f_{\#}$		1	0.54	0.55	0.45	0.3	0.36	0.17	0.37	0.29	-0.01	0.18	-0.05	0.35	0.29	-0.03	0.19	0.12	0.11	0.35	
CHAR _{surf.}			1	0.87	0.49	0.41	0.38	0.21	0.11	-0.04	-0.06	0.36	0.16	0.19	0.16	0.11	0.17	-0.15	0.1	0.22	
CHAR _#				1	0.16	0.16	0.41	0.29	0.13	-0.11	0.11	0.36	0.1	0.12	-0.13	-0.11	0.19	-0.11	0.13	0.3	

ANNEXE J

MATRICE DE CORRÉLATION DE SPEARMAN DU SITE LABELLE. ROUGE = CORRÉLATION POSITIVE. BLEU = CORRÉLATION NÉGATIVE. X = CORRÉLATION NON SIGNIFICATIVE.

	$f_{surf.}$	$f_{\#}$	CHAR _{surf.}	CHAR _#	<i>Abies balsamea</i>	<i>Acer saccharum</i>	<i>Betula</i>	<i>Picea mariana</i>	<i>Pinus strobus</i>	<i>Pinus type banksiana</i>	<i>Thuja/Juniperus</i>	<i>Larix laricina</i>	<i>Tsuga canadensis</i>	<i>Quercus</i>	<i>Ulmus</i>	<i>Fagus grandifolia</i>	<i>Fraxinus nigra</i>	<i>Populus tremuloidea</i>	<i>Alnus crispa</i>	<i>Alnus incana</i>
$f_{surf.}$	1	0.44	0.31	0.63	0.43	-0.05	0.63	0.53	X	X	X	0.26	X	X	-0.04	0.5	0.4	-0.23	0.46	0.35
$f_{\#}$	1	0.36	0.24	X	X	-0.01	0.45	0.35	-0.01	0.49	-0.06	-0.01	0.45	-0.06	-0.05	-0.05	0.44	-0.06	0.23	0.45
CHAR _{surf.}	1	0.77	0.5	0.32	0.54	0.61	X	0.42	0.29	-0.05	0.4	0.43	X	X	0.46	0.33	0.24	X	0.37	0.53
CHAR _#	1	0.6	0.26	0.58	0.63	0.27	X	0.7	X	X	0.44	0.43	X	X	0.1	0.26	0.4	-0.22	0.46	0.44

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

- Ali, A., Higuera, P. E., Bergeron, Y., & Carcaillet, C. (2009). Comparing fire-history interpretations based on area, number and estimated volume of macroscopic charcoal in lake sediments. *Quaternary Research*, 72(3), 462–468. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.yqres.2009.07.002>
- Ali, A., Asselin, H., Larouche, A. C., Bergeron, Y., Carcaillet, C., & Richard, P. J. H. (2008). Changes in fire regime explain the Holocene rise and fall of *Abies balsamea* in the coniferous forests of western Québec, Canada. *The Holocene*, 18(5), 693–703. <https://doi.org/10.1177/0959683608091780>
- Appleby, P. G., & Oldfieldz, F. (1983). The assessment of ²¹⁰Pb data from sites with varying sediment accumulation rates. *Hydrobiologia*, 103(1), 29–35. <https://doi.org/10.1007/BF00028424>
- Asselin, H., Payette, S., & Vall, S. (2003). The northern limit of *Pinus banksiana* Lamb. in Canada : explaining the difference between the eastern and western distributions. *Journal of Biogeography*, 30, 1709–1718.
- Beaudoin, A., Bernier, P. Y., Guindon, L., Villemaire, P., Guo, X. J., Stinson, G., ... Hall, R. J. (2014). Mapping attributes of Canada's forests at moderate resolution through kNN and MODIS imagery. *Canadian Journal of Forest Research*, 44(5), 521–532. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0401>
- Bennett, K. D. (1987). Holocene history of forest trees in southern Ontario. *Canadian Journal of Botany*, 65(9), 1792–1801.
- Bergeron, Y., & Brisson, J. (1990). Fire regime in red pine stands at the northern limit of the species range. *Ecology*, 71(4), 1352–1364.
- Bergeron, Y., Chen, H. Y. H., Kenkel, N. C., Leduc, A. L., & Macdonald, S. E. (2014). Boreal mixedwood stand dynamics : Ecological processes underlying multiple pathways. *The Forestry Chronicle*, 90(2).
- Bergeron, Y., & Dubuc, M. (1989). Succession in the southern part of the Canadian boreal forest. *Plant Ecology*, (79), 51–63.
- Bergeron, Y., Gauthier, S., & Flannigan, M. (2004). Fire regimes at the transition between mixedwood and coniferous boreal forest in northwestern Québec. *Ecology*, 85(7), 1916–1932.

- Bergeron, Y., Leduc, A., & Ting-Xian, L. (1997). Explaining the Distribution of *Pinus* spp. in a Canadian Boreal Insular Landscape. *Journal of Vegetation Science*, 8(1), 37–44. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/3237240>
- Bilodeau, J. (1992). *Écologie des érablières à sucre (Acer saccharum Marsh.) à leur limite de distribution au Saguenay-Lac-Saint-Jean*. Département des sciences fondamentales. Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi.
- Blaauw, M. (2010). Methods and code for “classical” age-modelling of radiocarbon sequences. *Quaternary Geochronology*, 5(5), 512–518.
- Blarquez, O., & Aleman, J. C. (2015). Tree biomass reconstruction shows no lag in postglacial afforestation of eastern Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 46(4), 485–498. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0201>
- Blarquez, O., Ali, A. A., Girardin, M. P., Grondin, P., Fréchette, B., Bergeron, Y., & Hély, C. (2015). Regional paleofire regimes affected by non-uniform climate, vegetation and human drivers. *Nature Publishing Group*, 1–13. <https://doi.org/10.1038/srep13356>
- Boisvert-Marsh, L., Périé, C., & de Blois, S. (2014). Shifting with climate? Evidence for recent changes in tree species distribution at high latitudes. *Ecosphere*, 5(7), 1–33. <https://doi.org/10.1890/ES14-00111.1>
- Campbell, I. D., & Flannigan, M. D. (2000). Long-term perspectives on fire-climate-vegetation relationships in the north American boreal Forest. In E. S. Kasischke & B. J. Stocks (Eds.), *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest* (pp. 151–172). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-21629-4_9
- Carcaillet, C., Bergeron, Y., Richard, P. J. H., Fréchette, B., Gauthier, S., & Prairie, Y. T. (2001). Change of fire frequency in the eastern Canadian boreal forests during the Holocene : does vegetation composition or climate trigger the fire regime ? *Journal of Ecology*, 930–946.
- Carcaillet, C., Richard, P. J. H., Bergeron, Y., Fréchette, B., & Ali, A. A. (2011). Resilience of the boreal forest in response to Holocene fire-frequency changes assessed by pollen diversity and population dynamics. *International Journal of Wildland Fire*, 19(8), 1026–1039.
- Chambers, F. M., Beilman, D. W., & Yu, Z. (2011). Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content

for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamics. *Mires and Peat*, 7(7), 1–10.

Collins, W. D., Bitz, C. M., Blackmon, M. L., Bonan, G. B., Bretherton, C. S., Carton, J. A., ... Henderson, T. B. (2006). The community climate system model version 3 (CCSM3). *Journal of Climate*, 19(11), 2122–2143.

Davis, M. B., Schwartz, M. W., & Woods, K. (1991). Detecting a species limit from pollen in sediments. *Journal of Biogeography*, 18(6), 653–668. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2845547>

Davis, R. B., & Jacobson, G. L. (1985). Late glacial and early Holocene landscapes in northern New England and adjacent areas of Canada. *Quaternary Research*, 23(3), 341–368.

De Groot, W. J., Flannigan, M. D., & Cantin, A. S. (2013). Climate change impacts on future boreal fire regimes. *Forest Ecology and Management*, 294, 35–44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.027>

De Lafontaine, G., & Payette, S. (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(2), 191–201. <https://doi.org/10.1177/0959683611414931>

Delcourt, H. R. (1979). Late quaternary vegetation history of the eastern highland rim and adjacent Cumberland plateau of Tennessee. *Ecological Monographs*, 49(3), 255–280. <https://doi.org/10.2307/1942485>

Després, T., Asselin, H., Doyon, F., & Bergeron, Y. (2014). Structural and Spatial Characteristics of Old-Growth Temperate Deciduous Forests at Their Northern Distribution Limit. *Forest Science*, 60(5), 871–880. <https://doi.org/10.5849/forsci.13-105>

Doyon, F., & Sougavinski, S. (2002). *Caractérisation du régime de perturbations naturelles de la forêt feuillue du nord-est de l'Amérique du Nord*. Institut Québécois d'aménagement de la forêt feuillue.

Drobyshev, I., Granstr, A., Linderholm, H. W., Hellberg, E., Bergeron, Y., & Mats, N. (2014). Multi-century reconstruction of fire activity in Northern European boreal forest suggests differences in regional fire regimes and their sensitivity to climate. *Journal of Ecology*, 102, 738–748. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12235>

- Dyke, A. S. (2005). An outline of North American Deglaciation with emphasis on central and northern Canada. *Developments in Quaternary Sciences*, 2, 373–424.
- Engelmark, O., Bergeron, Y., & Flannigan, M. (2000). Age structure of eastern white pine, *Pinus strobus* L., at its northern distribution limit in Quebec. *The Canadian Field-Naturalist*, 114(4), 601–604.
- Engstrom, F. B., & Mann, D. H. (1991). Fire ecology of red pine (*Pinus resinosa*) in northern Vermont, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 21(6), 882–889.
- Estes, B. L., Knapp, E. E., Skinner, C. N., Miller, J. D., & Preisler, H. K. (2017). Factors influencing fire severity under moderate burning conditions in the Klamath Mountains, northern California, USA. *Ecosphere*, 8(5), e01794–n/a. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1794>
- Faegri, K., Iversen, J., Waterbolk, H. T., Waterbolk, H. T., & Waterbolk, H. T. (1964). *Textbook of Pollen Analysis: (former Title: Textbook of Modern Pollen Analysis)*. Munksgaard.
- Fisichelli, N. A., Frelich, L. E., & Reich, P. B. (2014). Temperate tree expansion into adjacent boreal forest patches facilitated by warmer temperatures. *Ecography*, 37(2), 152–161. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00197.x>
- Flannigan, M., Bergeron, Y., Hély, C., Flannigan, M., Bergeron, Y., & Mcrae, D. (2001). Role of vegetation and weather on fire behavior in the Canadian mixedwood boreal forest using two fire behavior prediction. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 430–441. <https://doi.org/10.1139/cjfr-31-3-430>
- Fordham, D. A., Saltré, F., Brown, S. C., Mellin, C., & Wigley, T. M. L. (2017). Why decadal to century timescale palaeoclimate data are needed to explain present-day patterns of biological diversity and change. *Global Change Biology*, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1111/gcb.13932>
- Fordham, D. A., Saltré, F., Haythorne, S., Wigley, T. M. L., Otto-Bliesner, B. L., Chan, K. C., & Brook, B. W. (2017). PaleoView: a tool for generating continuous climate projections spanning the last 21 000 years at regional and global scales. *Ecography*, 40(11), 1348–1358. <https://doi.org/10.1111/ecog.03031>
- Frelich, L. E., & Lorimer, C. G. (1991). Natural disturbance regimes in hemlock-hardwood forests of the upper Great Lakes region. *Ecological Monographs*, 61(2), 145–164.
- Gaston, K. J. (2003). *The structure and dynamics of geographic ranges*. Oxford University Press on Demand.

- Gaston, K. J. (2009). Geographic range limits: achieving synthesis. *Proceedings of the royal society*, 276, 1395–1406.
- Girardin, M. P., Ali, A. A., Carcaillet, C., Blarquez, O., Hély, C., Terrier, A., ... Bergeron, Y. (2013). Vegetation limits the impact of a warm climate on boreal wildfires. *New Phytologist*, 199(4), 1001–1011.
- Graignic, N., Tremblay, F., & Bergeron, Y. (2014). Geographical variation in reproductive capacity of sugar maple (*Acer saccharum* Marshall) northern peripheral populations. *Journal of Biogeography*, 41(1), 145–157.
- Hargreaves, A. L., Samis, K. E., Eckert, C. G., Hargreaves, A. L., Samis, K. E., & Eckert, C. G. (2014). Are species range limits simply niche limits writ large? A Review of Transplant Experiments beyond the Range, 183(2), 157–173. <https://doi.org/10.1086/674525>
- Hély, C., Girardin, M. P., Ali, A. A., Carcaillet, C., Brewer, S., & Bergeron, Y. (2010). Eastern boreal North American wildfire risk of the past 7000 years : A model - data comparison. *Geophysical Research Letters*, 37, 1–6. <https://doi.org/10.1029/2010GL043706>
- Higuera, P. (2009). *CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis*.
- Higuera, P. E., Gavin, D. G., Bartlein, P. J., & Hallett, D. J. (2011). Peak detection in sediment–charcoal records: impacts of alternative data analysis methods on fire-history interpretations. *International Journal of Wildland Fire*, 19(8), 996–1014.
- Jetté, H., & Richard, P. J. H. (1992). Contribution à l’histoire postglaciaire de la végétation en Gaspésie méridionale, Québec. *Géographie Physique et Quaternaire*, 46(3), 273–284.
- Jr Little, E. L. (1971). *Atlas of United States Trees: Conifers and Important Hardwoods*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service Miscellaneous Publication (Vol. 1146).
- Kellman, M. (2004). Sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) establishment in boreal forest: results of a transplantation experiment. *Journal of Biogeography*, 31(9), 1515–1522.
- Labelle, C., & Richard, P. J. H. (1984). Histoire postglaciaire de la végétation dans la région de Mont-Saint-Pierre, Gaspésie, Québec. *Géographie Physique et Quaternaire*, 38(3), 257–274.

- Labelle, C., & Richard, P. J. H. (1981). Végétation tardiglaciaire et postglaciaire au sud-est du parc des Laurentides, Québec. *Géographie Physique et Quaternaire*, 35(3), 345–359.
- Lavoie, M., & Richard, P. J. H. (2000). Postglacial water-level changes of a small lake in southern Quebec, Canada. *The Holocene*, 10(5), 621–634.
- Lecomte, N., Simard, M., & Bergeron, Y. (2006). Effects of fire severity and initial tree composition on stand structural development in the coniferous boreal forest of northwestern Québec, Canada. *Écoscience*, 13(2), 152–163.
- Liu, K.-B. (1990). Holocene Paleoecology of the Boreal Forest and Great Lakes-St. Lawrence Forest in Northern Ontario. *Ecological Monographs*, 60(2), 179–212. <https://doi.org/10.2307/1943044>
- McAndrews, J. H. (1981). Late Quaternary Climate of Ontario : Temperature Trends from the Fossil Pollen Record. *Quaternary Paleoclimate*, 319–333.
- McAndrews, J. H., Berti, A. A., & Norris, G. (1973). *Key to the Quaternary pollen and spores of the Great Lakes region*. Toronto: Royal Ontario Museum.
- MDDELCC. (2017). Données climatiques. Retrieved from <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/climat/donnees/OQcarte.asp>
- MFFP. (2015). Inventaire écoforestier. Retrieved from <http://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/inventaire-ecoforestier/>
- MFFP. (2015). Carte des dépôts de surface du nord québécois. Retrieved from <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/carte-des-depots-de-surface-du-nord-quebecois>
- MFFP. (2003). Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec. Retrieved from <https://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/inventaire-zones-carte.jsp>
- Muller, S. D., & Richard, P. J. H. (2001). Post-glacial vegetation migration in conterminous Montréal Lowlands, southern Québec. *Journal of Biogeography*, 28(10), 1169–1193.
- Occhiotti, S., & Richard, P. J. H. (2003). Effet réservoir sur les âges ^{14}C de la Mer de Champlain à la transition Pléistocène-Holocène: révision de la chronologie de la déglaciation au Québec méridional. *Géographie Physique et Quaternaire*, 57(2–3), 115–138.

- Ohlson, M. (2012). Soil charcoal stability over the Holocene—Comment to the paper published by de Lafontaine and Asselin, *Quaternary Research*, v. 76, 2011, pp. 196–200. *Quaternary Research*, 78(1), 154.
- Parisien, M., & Sirois, L. (2003). Distribution and dynamics of tree species across a fire frequency gradient in the James Bay region of Quebec. *Canadian Journal of Botany*, 33, 243–256. <https://doi.org/10.1139/X02-182>
- Paul, V. (2011). *Les facteurs écologiques limitant la répartition nordique du thuya de l'est (Thuja occidentalis L.)*. Université Abitibi-Témiscamingue au Québec.
- Paul, V., Bergeron, Y., & Tremblay, F. (2014). Does climate control the northern range limit of eastern white cedar (*Thuja occidentalis* L.)? *Plant Ecology*. <https://doi.org/10.1007/s11258-013-0288-5>
- Payette, S., Delwaide, A., Schaffhauser, A., & Magnan, G. (2012). Calculating long-term fire frequency at the stand scale from charcoal data. *Ecosphere*, 3(7), 1–16. <https://doi.org/10.1890/ES12-00026.1>
- Pickett, S. T. A., & White, P. S. (1985). Patch dynamics: a synthesis. In *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics* (pp. 371–384).
- Piéré, C., de Blois, S., Lambert, M.-C., & Casajus, N. (2014). *Effets anticipés des changements climatiques sur l'habitat des espèces arborescentes au Québec*. Gouvernement du Québec.
- Pilon, V., & Payette, S. (2015). Sugar maple (*Acer saccharum*) forests at their northern distribution limit are recurrently impacted by fire. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(4), 452–462. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0322>
- Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Bronk Ramsey, C., ... Friedrich, M. (2013). IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 55(4), 1869–1887.
- Rémy, C., Hély, C., Blarquez, O., Magnan, G., Bergeron, Y., Lavoie, M., & Ali, A. (2017). Different regional climatic drivers of Holocene large wildfires in boreal forests of northeastern America. *Environmental Research Letters*, 12(3).
- Richard, P. J. H. (1995). Le couvert végétal du Québec-Labrador il y a 6000 ans BP: essai. *Géographie Physique et Quaternaire*, 49(1), 117–140.
- Richard, P. J. H. (1970). Atlas pollinique des arbres et quelques arbustes indigènes du Québec. *Le Naturaliste Canadien*, 97.

- Richard, P. J. H. (2003). Histoire postglaciaire de la végétation et du milieu en Outaouais: le point et les pistes de recherche. *L'île Aux Allumettes et l'Archaïque Supérieur Dans l'Outaouais. Recherches Amérindiennes Au Québec, Collection Paléo-Québec, Québec, QC*, 47–80.
- Richard, P. J. H. (1994). Wisconsinan Late-glacial environmental change in Québec: A regional synthesis. *Journal of Quaternary Science*, 9(2), 165–170.
- Richard, P. J. H. (1976). Relations entre la végétation actuelle et le spectre pollinique au Québec. *Le Naturaliste Canadien*, 103, 53–66.
- Richard, P. J. H. (2007). Le paysage tardiglaciaire du “Grand Méganticois”: État des connaissances. *Entre Lacs et Montagnes Au Méganticois*, 12(0), 21–45.
- Richard, P. J. H. (1973). Histoire postglaciaire comparée de la végétation dans deux localités au nord du Parc des Laurentides, Québec. *Naturaliste Canadien*, 100, 577–590.
- Richard, P. J. H. (1980). Histoire postglaciaire de la végétation au sud du lac Abitibi, Ontario et Québec. *Géographie Physique et Quaternaire*, 34(1), 77–94.
- Richard, P. J. H., & Grondin, P. (2009). *Histoire postglaciaire de la végétation. Manuel de Foresterie*. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec.
- Richard, P. J. H., Larouche, A. C., & Lortie, G. (1992). Paléophytogéographie et paléoclimats postglaciaires dans l'ouest du Bas-Saint-Laurent, Québec. *Géographie Physique et Quaternaire*, 46(2), 151–172.
- Richard, P. J. H., Veillette, J. J., Larouche, A. C., Héту, B., Gray, J. T., & Gangloff, P. (1997). Chronologie de la déglaciation en Gaspésie: nouvelles données et implications. *Géographie Physique et Quaternaire*, 51(2), 163–184.
- Richard, P. J. H. (1977). *Histoire post-wisconsinienne de la végétation du Québec méridional par l'analyse pollinique*. Service de la recherche, Direction générale des forêts, Ministères des terres et forêts du Québec.
- Runkle, J. R., Pickett, S. T. A., & White, P. S. (1985). Disturbance regimes in temperate forests. In A. Press (Ed.), *The ecology of natural disturbance and patch dynamics* (pp. 17–33).
- Runkle, J. R. (1982). Patterns of disturbance in some old-growth mesic forests of eastern North America. *Ecology*, 63(5), 1533–1546.

- Sexton, J. P., McIntyre, P. J., Angert, A. L., & Rice, K. J. (2009). Evolution and ecology of species range limits. *Annual Review of Ecology, and Systematics*, 40.
- Stocks, B. J., Wotton, B. M., Flannigan, M. D., Fosberg, M. A., Cahoon, D. R., & Goldammer, J. G. (2001). Boreal forest fire regimes and climate change. In M. Beniston & M. M. Verstraete (Eds.), *Remote Sensing and Climate Modeling: Synergies and Limitations* (pp. 233–246). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/0-306-48149-9_10
- Stocks, B. J., Fosberg, M. A., Lynham, T. J., Mearns, L., Wotton, B. M., Yang, Q., ... Mason, J. A. (1998). Climate change and forest fire potential in Russian and Canadian boreal forests. *Climatic Change*, 38(1), 1–13.
- Talon, B., Payette, S., Filion, L., & Delwaide, A. (2005). Reconstruction of the long-term fire history of an old-growth deciduous forest in Southern Québec, Canada, from charred wood in mineral soils. *Quaternary Research*, 64(1), 36–43.
- Veillette, J. J. (1994). Evolution and paleohydrology of glacial Lakes Barlow and Ojibway. *Quaternary Science Reviews*, 13(9), 945–971. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0277-3791\(94\)90010-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0277-3791(94)90010-8)
- Veillette, J. (1988). Déglaciation et évolution des lacs proglaciaire post-Algonquin et Barlow au Témiscamingue, Québec et Ontario. *Géographie Physique et Quaternaire*, 42(1). <https://doi.org/10.7202/032706ar>
- Veillette, J. J. (1996). *Géomorphologie et géologie du quaternaire du Témiscamingue, Québec et Ontario. Geological survey of Canada.*
- Watts, W. A. (1979). Late Quaternary Vegetation of Central Appalachia and the New Jersey Coastal Plain. *Ecological Monographs*, 49(4), 427–469. <https://doi.org/10.2307/1942471>
- Wotton, B. M., Flannigan, M., & Marshall, G. A. (2017). Potential climate change impacts on fire intensity and key wildfire suppression thresholds in Canada. *Environmental Research Letters*, (12).
- Yu, Z. (1997). Late Quaternary paleoecology of *Thuja* and *Juniperus* (Cupressaceae) at Crawford Lake, Ontario, Canada: pollen, stomata and microfossils. *Review of Paleobotany and Palynology*, (96), 241–254.