

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL EN EXTENSION DE L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN  
ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

VARIATIONS DU RÉGIME DES FEUX EN RÉPONSE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES  
HOLOCÈNES À LA LIMITE NORDIQUE DE LA FORÊT COMMERCIALE AU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

PAR

AHMED EL GUELLAB

AVRIL 2012

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier sincèrement mes deux directeurs Hugo Asselin et Adam A. Ali pour la confiance qu'ils m'ont accordée depuis le début. Leur grande disponibilité et leur efficacité m'ont permis de réaliser mon projet de maîtrise dans de bonnes conditions. Je les remercie aussi pour la qualité de la relation qu'ils ont toujours entretenue avec moi, et pour leur côté humain.

Je voudrais également remercier Yves Bergeron et Sylvie Gauthier pour leurs commentaires qui m'ont été utiles pour la rédaction de mon proposé de recherche. Je remercie aussi toutes les personnes que j'ai eu la chance de croiser et de côtoyer pendant mes séjours à la station de recherche de la Forêt d'enseignement et de recherche du lac Duparquet. Merci à tous les chercheurs de la Chaire AFD avec qui j'ai passé de bons moments dans une ambiance de diversité.

Un merci spécial aux membres de ma famille : mes chers parents, Lahoucine et Khadija; mes frères et sœurs, Rachid, Fatima, Mouloud, Sara et Abderrahim; mes cousins, Younous, Youssef et Ayoub; sans oublier les nouveaux membres, Ilyass et Sarah. Votre amour a toujours su comment traverser l'océan.

## AVANT-PROPOS

Ce mémoire est composé de trois chapitres. Le premier chapitre est constitué d'une introduction générale et du contexte de la recherche. Le deuxième chapitre contient les résultats de mon projet de maîtrise. Il est écrit sous la forme d'un manuscrit d'article scientifique en français qui sera éventuellement traduit en anglais pour le soumettre à une revue scientifique avec comité de lecture. Enfin, le dernier chapitre est une conclusion générale qui synthétise l'ensemble des résultats et dans laquelle des recommandations pour l'aménagement écosystémique et des perspectives de recherche sont présentées.

## TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS .....	iii
LISTE DES FIGURES .....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	v
RÉSUMÉ .....	iv
CHAPITRE I	
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
1.1 Les feux de forêt .....	2
1.2 Méthodes de reconstitution de l'historique des feux.....	3
1.3 Changements climatiques holocènes .....	4
1.4 Changements climatiques actuels et futurs .....	4
1.5 Coupe forestière et aménagement écosystémique.....	5
1.6 Contexte de la recherche .....	6
1.7 Références bibliographiques .....	7
CHAPITRE II	
VARIATIONS DU RÉGIME DES FEUX EN RÉPONSE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES HOLOCÈNES À LA LIMITE NORDIQUE DE LA FORÊT COMMERCIALE AU QUÉBEC .....	15
2.1 Résumé.....	16
2.2 Introduction.....	17
2.3 Matériel et méthodes.....	19
2.3.1 Aire d'étude .....	19
2.3.2 Échantillonnage.....	20
2.3.3 Quantification des charbons de bois .....	21
2.3.4 Datations au radiocarbone.....	21

2.3.5	Reconstitution des événements de feux .....	22
2.3.6	Comparaison des régimes de feux des quatre lacs .....	23
2.4	Résultats .....	23
2.4.1	Modèles âge-profondeur et fluctuation du CHAR .....	23
2.4.2	Reconstitution des feux .....	28
2.4.3	Comparaison des régimes de feux des quatre lacs .....	29
2.5	Discussion .....	32
2.6	Conclusion .....	34
2.7	Références bibliographiques .....	35
CHAPITRE III		
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	39
3.1	Perspectives de recherche .....	40
3.2	Références bibliographiques .....	41

## LISTE DES FIGURES

Figure .....	Page
2.1 Localisation des quatre lacs échantillonnés, à la limite nordique de la forêt commerciale (ligne noire). La zone en gris foncé dans l'encadré représente le sous-domaine bioclimatique de la pessière à mousses de l'Ouest. ....	19
2.2 Modèles âge-profondeur pour les quatre lacs étudiés. ....	25
2.3 Taux d'accumulation de charbon (TAC = CHAR) pour les lacs Aurélie, Richard, Nans et Twin (A-a, B-a, C-a, D-a). La ligne grise représente le bruit de fond. Les pics de feux déduits après avoir enlevé le bruit de fond sont également présentés (A-b, B-b, C-b, D-b). Les lignes rouges sont les valeurs seuils déterminant le $C_{noise}$ . Les « + » indiquent les événements de feu détectés. ....	26
2.4 Occurrence des feux exprimée par le nombre d'événements de feu par 1000 ans pour les lacs Aurélie, Nans, Richard et Twin. Les rectangles gris représentent l'Optimum climatique holocène (OCH) et l'Optimum climatique médiéval (OCM). ....	28
2.5 Moyenne régionale de l'occurrence des feux calculée à partir de celles des quatre lacs. L'intervalle de confiance à 95 % est représenté en bleu. Les rectangles gris représentent l'Optimum climatique holocène (OCH) et l'Optimum climatique médiéval (OCM) .....	29
2.6 Analyses du synchronisme des événements de feu détectés aux lacs Aurélie, Nans, Richard et Twin. La ligne bleue présente la fonction L et les lignes pointillées rouges correspondent à l'intervalle de confiance à 95 % et 99 %. ....	31

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau.....	Page
2.1 Caractéristiques des lacs échantillonnés. ....	20
2.2 Datations au radiocarbone obtenues pour chacun des lacs (Beta = Beta Analytic Inc.; Poz = Poznan Radiocarbon Laboratory; SacA = Laboratoire de mesure du carbone 14)24	
2.3 Comparaison des valeurs médianes des intervalles entre les feux (FRI) (test de Kruskal-Wallis) pour les quatre lacs étudiés.....	30
2.4 Comparaison de la distribution des intervalles entre les feux (FRI) (test de Kolmogorov-Smirnov, $\alpha = 0,05$ ) pour les quatre lacs étudiés (A = Aurélie; N = Nans; R = Richard; T = Twin). ....	30

## RÉSUMÉ

La forêt boréale du Québec fait face à une pression de plus en plus importante de l'industrie forestière, qui étend ses pratiques vers le nord. Le milieu socio-économique suggère une extension plus au nord de la limite nordique de la forêt boréale commerciale, alors que le milieu environnemental milite plutôt pour un réajustement vers le sud de la limite. Dans ce contexte, pour limiter l'impact des activités anthropiques sur le fonctionnement des écosystèmes, une des stratégies est de faire en sorte que leurs effets ne dépassent pas les limites de variabilité des perturbations naturelles. Pour ce faire, il est primordial de développer des stratégies d'aménagement forestier durable qui prennent ancrage dans une solide connaissance de la dynamique des perturbations naturelles. Le feu est le principal régime de perturbation de la forêt boréale. Or, ce régime de perturbation et l'influence du climat sur celui-ci est encore peu documenté à la limite nordique de la forêt commerciale québécoise, à une large échelle spatio-temporelle.

Les objectifs de ce projet de maîtrise consistaient, d'une part, à caractériser la dynamique des incendies forestiers à l'échelle de l'Holocène. La reconstitution des feux a été réalisée par le biais de l'analyse des charbons de bois préservés dans les sédiments de quatre lacs situés au nord de la ville de Chibougamau. D'autre part, ce mémoire visait à évaluer l'impact du climat et des facteurs locaux sur le régime des feux.

Le climat régional et les facteurs locaux influencent le régime des feux à la limite nordique de la forêt boréale commerciale au Québec. L'occurrence des feux a connu des augmentations importantes durant les périodes chaudes et sèches de l'Holocène, notamment au cours de l'Optimum climatique holocène et l'Optimum climatique médiéval. Les feux ont été moins fréquents durant les quatre derniers millénaires comparativement à l'Holocène moyen (7000 à 4000 cal. BP).

Les fréquences de feux enregistrées durant les derniers siècles demeurent encore à l'intérieur de la variabilité naturelle à l'échelle de l'Holocène. Toutefois, si l'augmentation de température prévue pour les prochaines décennies n'est pas compensée par une augmentation des précipitations, le scénario holocène se répétera et l'occurrence des feux augmentera à la limite nordique de la forêt boréale commerciale au Québec, limitant la marge de manœuvre pour la récolte forestière.

Mots clés : Charbons de bois, feux de forêt, Holocène, climat, limite nordique de la forêt commerciale.

## CHAPITRE I

### INTRODUCTION GÉNÉRALE

La forêt boréale est le plus vaste biome terrestre de la planète, elle couvre environ 30 % de la superficie forestière mondiale (Burton et al. 2003). Cet écosystème procure plusieurs services écologiques fondamentaux au développement de la planète (Costanza et al. 1997). Parmi les services écologiques importants fournis par la forêt boréale figurent la formation et la stabilisation des sols (Costanza et al. 1997) et la régulation du climat planétaire (Snyder et al. 2004), adossé au cycle global du carbone. Le climat et les perturbations naturelles sont des facteurs majeurs qui ont influencé la dynamique de la forêt boréale depuis des millénaires (Bonan et Shugart 1989; Campbell et Flannigan 2000; Soja et al. 2007).

Le climat joue un rôle prépondérant dans la répartition et la dynamique de la végétation dans la forêt boréale (Woodward 1987; Weber et Flannigan 1997). Il influence la répartition spatiale et l'immigration des espèces végétales (Iverson et Prasad 1998; Hamann et Wang 2006; Soja et al. 2007), ainsi que leur reproduction (Sirois 2000; Messaoud et al. 2007). Les changements de température, de concentration de CO<sub>2</sub> et de la quantité de précipitations agissent sur la photosynthèse et l'évapotranspiration, ce qui influence la croissance des arbres (Bonan et Shugart 1989; Brooks et al. 1998; Barber et al. 2000). Les variations de l'épaisseur du couvert de neige, le régime du vent, les inondations, les tempêtes de verglas, entre autres, sont également des facteurs climatiques qui influencent la structure, la composition et les dynamiques de végétation (Foster 1988; Walker et al. 1993; Irland, 2000; Denneler et al. 2008). En plus de cet impact direct du climat sur la végétation, s'ajoute un impact indirect qui se manifeste via l'altération des régimes de perturbation.

Les perturbations naturelles sont des événements qui font partie intégrante de la dynamique forestière boréale et elles opèrent à différentes échelles d'espace et de temps (Turner et al. 1993, 1998). L'écosystème, ainsi que les organismes qui y vivent sont bien adaptés à ces perturbations (Hunter et al. 1988; Arseneault et Sirois 2004). Les perturbations

influencent la productivité et la dynamique de la biodiversité (Drapeau et al. 2000; Cardinale et al. 2005), et agissent d'une manière importante sur le fonctionnement et la composition des écosystèmes, ainsi que sur leur dynamique (Hunter et al. 1988; Gauthier et al. 2001, Arseneault et Sirois 2004). En forêt boréale, les incendies forestiers sont la perturbation la plus importante (Payette 1992; Gauthier et al. 2001). Les épidémies d'insectes défoliateurs causent aussi beaucoup de dommages dans la forêt boréale québécoise, surtout la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clem.) et la livrée des forêts (*Malacosoma disstria* Hbn.) (Morin 1998; Jardon et al. 2003; Cooke et Lorenzetti 2006). Les chablis, les maladies, ou la sénescence des arbres sont aussi des agents perturbateurs qui peuvent agir à l'échelle locale (Morin 1990; Lussier et al. 2002; Zarnovican 2002).

### 1.1. Les feux de forêt

Les feux sont la principale perturbation qui influence le paysage de la forêt boréale nord-américaine (Johnson 1992; Payette 1992). Ils ont une influence majeure sur la composition végétale, en diminuant l'abondance de la végétation de sous-bois et, par conséquent, la compétition entre les espèces. De plus, après un feu, les espèces survivantes ou qui s'établissent rapidement sont plus ou moins favorisées. En effet, les feux agissent sur les propriétés chimiques du sol, la disponibilité de lits de germination, la dynamique des populations d'animaux notamment par la création d'habitats propices et le recyclage des éléments nutritifs (Kilgore 1973; Rowe et Scotter 1973). Les feux aident également à l'élimination des arbres vulnérables aux épidémies et aux invasions d'insectes (Bergeron et Leduc 1998).

Plusieurs facteurs agissent sur le comportement et l'impact des incendies forestiers. La composition spécifique et la structure des peuplements influencent la probabilité d'occurrence et la propagation des incendies (Bergeron et al. 2004b; Krawchuk et al. 2006). En effet, l'occurrence des feux est plus importante dans des paysages résineux que feuillus (différence dans la continuité et la disponibilité de combustible) (Renkin et Despain 1992; Hély et al. 2000). Les facteurs topographiques peuvent également influencer le régime des feux (pente, orientation, coupe-feux, etc.) (Rowe et Scotter 1973; Bergeron 1991; Cyr et al. 2007), de même que les facteurs climatiques et météorologiques.

Le régime des feux semble principalement contrôlé par le climat et les conditions météorologiques (Flannigan et al. 1998; Flannigan et al. 2005b; Girardin et al. 2008; Hély et al. 2010). À l'échelle locale, le comportement du feu est influencé par les conditions météorologiques comme l'humidité du combustible (qui dépend de la quantité de précipitations), l'humidité et la température de l'air, ainsi que la vitesse du vent (Weber et Flannigan 1997). À une échelle spatiotemporelle plus large, se sont les variations du climat et les interactions avec les oscillations océaniques et atmosphériques qui contrôlent le régime des feux (Girardin et al. 2008; Walsh et al. 2008; Skinner et al., 2006). Cette étroite relation entre les variations du climat et le régime de feux se distingue également dans le passé (Flannigan et Harrington 1988; Ali et al. 2009; Flannigan et al. 2009; Hély et al., 2010).

### 1.2. Méthodes de reconstitution de l'historique des feux

Pour reconstituer l'historique des feux de forêt et caractériser sa variabilité naturelle, plusieurs méthodes peuvent être utilisées. Les sources documentaires, comme les premières descriptions des voyageurs, des naturalistes, des arpenteurs et des forestiers, peuvent fournir des informations sur la forêt et sur l'histoire des incendies en Amérique du Nord depuis la colonisation européenne (Foster 2002; Pyne 2007). L'analyse des cernes annuels de croissance des arbres (dendrochronologie) peut également être utilisée pour reconstituer les feux passés (Buechling et Baker 2004; Whitlock et al. 2004; Le Goff et al. 2008b). La dendrochronologie permet d'étudier les événements passés avec une excellente résolution temporelle et spatiale. Cependant, il est généralement impossible de remonter plus de quelques siècles dans le passé, à cause de la longévité limitée des arbres (Whitlock et al. 2004). Pour remédier à ce manque de recul temporel, une approche intéressante est fondée sur l'analyse des charbons de bois conservés dans les sédiments lacustres ou tourbeux, de même que dans les sols forestiers (e.g. Tolonen 1986; Ali et al. 2008; de Lafontaine et Asselin 2011). Dépendamment de la taille des charbons étudiés et de la technique utilisée, il est possible de reconstituer l'historique des incendies à l'échelle locale ou régionale (MacDonald et al. 1991; Carcaillet et al. 2001; Asselin et Payette 2005a; Tinner et Hu 2003; Whitlock et al. 2004; Higuera et al. 2007).

### 1.3. Changements climatiques holocènes

Le climat a connu plusieurs fluctuations durant l'Holocène, avec une alternance de périodes chaudes et froides. À la fin de la période glaciaire (aux alentours de 11500 cal. BP) le climat au nord-est de l'Amérique du Nord était encore froid, avant de commencer à se réchauffer pendant la période de transition entre la fin de la période glaciaire et le début de l'Holocène (interglaciaire) (COHMAP 1988). Le réchauffement continuera jusqu'à l'Holocène moyen (10800 à 5400 cal. BP) avec des étés plus chauds (Bartlein et al. 1998). Ce réchauffement climatique est dû à l'augmentation de l'insolation estivale, qui a provoqué une augmentation des températures pendant l'été. L'augmentation a été plus marquée au nord-ouest de l'Amérique du Nord qu'au nord-est. Vers 6000 cal. BP, les températures étaient de 2 à 4 °C plus élevées qu'actuellement sur l'ensemble de l'Amérique du Nord (COHMAP 1988; Richard 1995, Viau et al. 2006). De 5400 à 100 cal. BP le climat a connu un refroidissement dû à la diminution de l'insolation estivale au nord du continent américain (Bartlein et al. 1998), malgré deux anomalies majeures : l'optimum climatique médiéval (entre 1100 et 700 cal. BP) où le climat était plus chaud (Lamarche 1973; Brunelle et Whitlock 2003), et le petit âge glaciaire qui a eu lieu entre 600 et 100 cal. BP, avec un climat froid (Wiles et al. 1999; Grove 2001).

### 1.4. Changements climatiques actuels et futurs

La température moyenne à la surface de la Terre a augmenté de 0,74 °C au cours du XX<sup>e</sup> siècle et les modèles climatiques prévoient que la tendance au réchauffement continuera au XXI<sup>e</sup> siècle (IPCC 2007). En outre, le réchauffement sera plus marqué aux latitudes élevées. L'ampleur des changements climatiques laisse supposer qu'ils auront un effet majeur sur le fonctionnement des écosystèmes boréaux, notamment en agissant sur les régimes de perturbations (Weber et Flannigan 1997; Bergeron 1998; Flannigan et al. 2005a).

L'impact du réchauffement climatique sur la forêt boréale du Canada pourra varier selon les particularités de chaque région. Des études menées dans l'ouest canadien suggèrent une augmentation des superficies brûlées en réponse au réchauffement climatique (Flannigan et Van Wagner 1991; Flannigan et al. 2005a). Dans l'est du pays et selon la méthodologie et les scénarios utilisés, il existe deux hypothèses différentes. La première prévoit que le

réchauffement pourrait être accompagné de précipitations plus importantes et ainsi résulter en fréquences de feux plus faibles (Bergeron et Archambault 1993; Bergeron et Flannigan 1995; Bergeron et al. 2001, 2006). La deuxième hypothèse prévoit plutôt une augmentation de la fréquence des feux dans le futur, sous l'effet d'une augmentation des températures non compensée par une augmentation significative des précipitations (Hély et al. 2010).

### 1.5. Coupe forestière et aménagement écosystémique

Avec l'industrialisation de l'exploitation forestière, la coupe s'ajoute aux autres facteurs responsables de la dynamique de la forêt boréale nord-américaine. Comparativement au feu, l'aménagement forestier tend à diminuer la diversité spécifique à l'échelle du paysage et à modifier la répartition des classes d'âge en faveur des jeunes forêts (Bergeron et al. 2001; Bergeron et Le Goff 2005; Cyr et al. 2009). L'aménagement écosystémique a été proposé comme une solution alternative à l'aménagement forestier conventionnel pour réduire l'écart entre les paysages naturels et aménagés (Jetté et al. 2008) et vise à maintenir les écosystèmes forestiers à l'intérieur de leur étendue historique de variabilité (Cyr et al. 2009). Cette approche à l'aménagement des forêts se base sur une connaissance approfondie du régime des perturbations naturelles (Gauthier et al. 2008). En effet, l'aménagement écosystémique consiste à utiliser des approches d'aménagement du territoire et des méthodes sylvicoles permettant de reproduire les patrons spatiotemporels engendrés par les perturbations naturelles (Bergeron et al. 1999). L'approche proposée par Bergeron et al. (1999), dite « des trois cohortes », est applicable aux paysages boréaux contrôlés par le feu et s'appuie sur le fait que les fréquences de feux actuelles sont plus faibles que les fréquences historiques (Bergeron et al. 2006). Ainsi, même en additionnant les effets des feux et des coupes, les superficies perturbées totales demeurent, en principe, à l'intérieur de l'étendue historique de variabilité. Les changements climatiques futurs auront certainement un impact sur le régime des feux; il est par conséquent important de prendre en considération leur effet potentiel dans la planification des pratiques forestières (Le Goff et al. 2005, 2008a). Si les fréquences de feux augmentent dans le futur, il faudra réduire l'ampleur des récoltes forestières et prendre d'autres mesures adaptatives pour maintenir le caractère naturel historique et les services écologiques de cet écosystème (suppression des feux, coupes de récupération systématiques, amélioration de la régénération) (Le Goff et al. 2005; Bergeron et al. 2006). Si les fréquences

de feux sont plus faibles que les fréquences historiques, on pourra alors potentiellement substituer le feu par un aménagement qui créera des patrons de paysage en termes de composition et de structure d'âge qui ressemblent à ceux issus des feux de forêt (Bergeron et al. 2004a; 2006).

#### 1.6. Contexte de la recherche

Au Québec, le territoire situé à la limite nordique de la forêt commerciale renferme des milieux biophysiques diversifiés (MRNQ 2000). Des pressions socioéconomiques militent en faveur d'une extension vers le nord de la forêt commerciale, alors que des pressions environnementales favorisent un repositionnement plus au sud de la limite. Cette divergence de points de vue découle en partie d'un manque de connaissances de la dynamique des forêts de cette région et du régime de perturbations associé. La résilience des peuplements forestiers aux incendies permet le maintien à long terme des principales fonctions de l'écosystème. Cependant, l'impact des changements climatiques sur le régime des feux ainsi que sur la résilience à la limite nordique de la forêt commerciale a jusqu'à maintenant été peu étudié. Pourtant, l'ouverture du couvert forestier observée dans la zone de la limite nordique de la forêt commerciale laisse présager un problème de résilience qu'il importe de documenter (Girard et al. 2008; 2009). Selon Asselin et Payette (2005b), la toundra forestière du Québec, aujourd'hui caractérisée par des pessières à lichens, résulte de l'ouverture graduelle par les feux au cours des derniers 3000 ans d'un paysage auparavant caractérisé par des pessières à mousses. Un phénomène similaire de remplacement de pessières à mousses par des pessières à lichens a aussi été documenté plus au sud, sous l'effet de perturbations en rafales (Jasinski et Payette 2005; Girard et al. 2009). Ces transformations montrent la fragilité de la pessière à mousses au nord de son aire de répartition. L'aménagement forestier ajoute donc une pression supplémentaire au fonctionnement de la pessière à mousses et risque d'entraîner les écosystèmes en dehors de leurs limites naturelles de variabilité, avec le développement de trajectoires écologiques aboutissant à des états alternatifs stables (Jasinski et Payette 2005). L'incertitude demeure en ce qui concerne la dynamique future de la pessière à mousses dans la partie nordique de son aire de répartition, qui englobe la limite actuelle de la forêt commerciale au Québec. Il est donc important de pouvoir caractériser la variabilité naturelle des feux dans cette partie de la pessière à mousses afin de pouvoir y adosser de façon

optimale une activité économique durable au regard des changements climatiques en cours. Cette démarche scientifique est indispensable afin de minimiser le risque d'un changement irréversible des écosystèmes.

Dans cette optique, ce projet de maîtrise – qui s'insère dans une programmation de recherche sur l'historique des feux et la résilience des forêts à la limite nordique de la forêt commerciale – vise d'une part, à reconstituer l'historique holocène des feux à la limite nordique de la forêt commerciale par le biais de l'analyse des charbons de bois préservés dans les sédiments de quatre lacs au nord de Chibougamau. D'autre part, le projet vise à mettre en relation les changements passés du régime des feux avec les grandes fluctuations climatiques ayant eu lieu durant l'Holocène.

#### 1.7. Références bibliographiques

Ali, A.A., Asselin, H., Larouche, A., Bergeron, Y., Carcaillet, C., et 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. *Holocene* **18**: 693-703.

Ali, A.A., Carcaillet, C., et Bergeron, Y. 2009. Long-term fire frequency variability in the eastern Canadian boreal forest: the influences of climate vs. local factors. *Global Change Biology* **15**: 1230-1241.

Arseneault, D., et Sirois, L. 2004. The millennial dynamics of a boreal forest stand from buried trees. *Journal of Ecology* **92**: 490-504.

Asselin, H., et Payette, S. 2005a. Detecting local-scale fire episodes on pollen slides. *Review of Palaeobotany and Palynology* **137**: 31-40.

Asselin, H., et Payette, S. 2005b. Late Holocene opening of the forest tundra landscape in northern Québec, Canada. *Global Ecology and Biogeography* **14**: 307-313.

Barber, V.A., Juday, G.P., et Finney, B.P. 2000. Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature* **405**: 668-673.

Bartlein, P.J., Anderson, K.H., Anderson, P.M., Edwards, M.E., Mock, C.J., Thompson, R.S., Webb, R.S., Webb, T., et Whitlock, C. 1998. Paleoclimate simulations for North America over the past 21,000 years: features of the simulated climate and comparisons with paleoenvironmental data. *Quaternary Science Reviews* **17**: 549-585.

Bergeron, Y. 1991. The influence of island and mainland lakeshore landscapes on boreal forest fire regimes. *Ecology* **72**: 1980-1992.

Bergeron, Y. 1998. Les conséquences des changements climatiques sur la fréquence des feux et la composition forestière au sud-ouest de la forêt boréale québécoise. *Géographie physique et Quaternaire* **52**: 167-174.

Bergeron, Y., et Archambault, S. 1993. Decreasing frequency of forest fires in the southern boreal zone of Québec and its relation to global warming since the end of the 'Little Ice Age'. *Holocene* **3**: 255-259.

Bergeron, Y., et Flannigan, M.D. 1995. Predicting the effects of climate change on fire frequency in the southeastern Canadian boreal forest. *Water, Air and Soil Pollution* **82**: 437-444

Bergeron, Y., et Leduc, A. 1998. Relationships between change in fire frequency and mortality due to spruce budworm outbreak in the southeastern Canadian boreal forest. *Journal of Vegetation Science* **9**: 492-500.

Bergeron, Y., et Le Goff, H. 2005. Doit-on remettre en question notre façon d'aménager la forêt boréale canadienne? *VertigO* **6**: 1-7.

Bergeron, Y., Harvey, B., Leduc, A., et Gauthier, S. 1999. Strategies d'aménagement forestier qui s'inspirent de la dynamique des perturbations naturelles : considérations à l'échelle du peuplement et de la forêt. *Forestry Chronicle* **75**: 55-61.

Bergeron, Y., Gauthier, S., Kafka, V., Lefort, P., et Lesieur, D. 2001. Natural fire frequency for the eastern Canadian boreal forest: consequences for sustainable forestry. *Canadian Journal of Forest Research* **31**: 384-391.

Bergeron, Y., Flannigan, M., Gauthier, S., Leduc, A., et Lefort, P. 2004a. Past, current and future fire frequency in the Canadian boreal forest: Implications for sustainable forest management. *Ambio* **33**: 356-360.

Bergeron, Y., Gauthier, S., Flannigan, M., et Kafka, V. 2004b. Fire regimes at the transition between mixedwood and coniferous boreal forest in northwestern Quebec. *Ecology* **85**: 1916-1932.

Bergeron, Y., Cyr, D., Drever, C.R., Flannigan, M., Gauthier, S., Kneeshaw, D., Lauzon, É., Leduc, A., Le Goff, H., Lesieur, D., et Logan, K. 2006. Past, current, and future fire frequencies in Quebec's commercial forests: implications for the cumulative effects of harvesting and fire on age-class structure and natural disturbance-based management. *Canadian Journal of Forest Research* **36**: 2737-2744.

Bonan, G.B., et Shugart, H.H. 1989. Environmental factors and ecological processes in boreal forests. *Annual Review of Ecology and Systematics* **20**: 1-28.

Brooks, J.R., Flannagan, L.B., et Ehleringer, J. 1998. Responses of boreal conifers to climate fluctuations: indications from tree-ring widths and carbon isotope analyses. *Canadian Journal of Forest Research* **28**: 524-533.

Brunelle, A., et Whitlock, C. 2003. Postglacial fire, vegetation, and climate history in the Clearwater Range, Northern Idaho, USA. *Quaternary Research* **60**: 307-318.

Buechling, A., et Baker, W.L. 2004. A fire history from tree rings in a high-elevation forest of Rocky Mountain National Park. *Canadian Journal of Forest Research* **34**: 1259-1273.

Burton, P.J., Messier, C., Weetman, G.F., Prepas, E.E., Adamowicz, W.L. et Tittler, R. 2003. The current state of boreal forestry and the drive for change. *In* Burton, P.J., Messier, C., Smith, D.W., et Adamowicz, W.L. (Dir.), *Towards sustainable management of the boreal forest*. NRC Research Press, Ottawa. pp. 1-40.

Campbell, I.D., et Flannigan, M.D. 2000. Long-term perspectives on fire-climate-vegetation relationships in the North American boreal forest. *In* Kasischke E.S., et Stocks B.J. (Dir.), *Fire, climate change and carbon cycling in the boreal forest*. Ecological Studies Series, Springer-Verlag, New York. pp. 151-172.

Carcaillet, C., Bouvier, M., Fréchette, B., Larouche, A.C., et Richard, P.J.H. 2001. Comparison of pollen-slide and sieving methods in lacustrine charcoal analyses for local and regional fire history. *Holocene* **11**: 467-476.

Cardinale, B.J., Palmer, M.A., Ives, A.R., et Brooks, S.S. 2005. Diversity-productivity relationships in streams vary as a function of the natural disturbance regime. *Ecology* **86**: 716-726.

COHMAP. 1988. Climatic changes of the last 18,000 years: Observations and model simulations. *Science* **241**: 1043-1052.

Cooke, B.J., et Lorenzetti, F. 2006. The dynamics of forest tent caterpillar outbreaks in Québec, Canada. *Forest Ecology and Management* **226**: 110-121.

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., et van den Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* **387**: 253-260

Cyr, D., Gauthier, S., et Bergeron, Y. 2007. Scale-dependent determinants of heterogeneity in fire frequency in a coniferous boreal forest of eastern Canada. *Landscape Ecology* **22**: 1325-1339.

Cyr, D., Gauthier, S., Bergeron, Y., et Carcaillet, C. 2009. Forest management is driving the eastern North American boreal forest outside its natural range of variability. *Frontiers in Ecology and the Environment* **7**: 519-524.

de Lafontaine, G., et Asselin, H. 2011. Soil charcoal stability over the Holocene across boreal northeastern North America. *Quaternary Research* **76**: 196-200.

Denneler, B., Asselin, H., Bergeron, Y., et Begin, Y. 2008. Decreased fire frequency and increased water levels affect riparian forest dynamics in southwestern boreal Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* **38**: 1083–1094.

Drapeau, P., Leduc, A., Giroux, J.-F., Savard, J.-P.L., Bergeron, Y., et Vickery, W.L. 2000. Landscape-scale disturbances and changes in bird communities of boreal mixed-wood forests. *Ecological Monographs* **70**: 423–444.

Flannigan, M.D., et Harrington, J.B. 1988. A study of the relation of meteorological variables to monthly provincial area burned by wildfire in Canada (1953-80). *Journal of Applied Meteorology* **27**: 441–452.

Flannigan, M.D., et Van Wagner, C.E. 1991. Climate change and wildfire in Canada. *Canadian Journal of Forest Research* **21**: 66–72.

Flannigan, M.D., Bergeron, Y., Engelmark, O., et Wotton, B.M. 1998. Future Wildfire in Circumboreal Forests in Relation to Global Warming. *Journal of Vegetation Science* **9**: 469–476.

Flannigan, M.D., Amiro, B.D., Logan, K.A., Stocks, B.J., et Wotton, B.M. 2005a. Forest fires and climate change in the 21st century. *Migration and Adaptation Strategies for Global Change* **11**: 874–859.

Flannigan, M.D., Logan, K.A., Amiro, B.D., Skinner, W.R., et Stocks, B.J. 2005b. Future area burned in Canada. *Climatic Change* **72**: 1–16.

Flannigan, M., Stoks, B., Turetsky, M., et Wotton, M. 2009. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology* **15**: 549–560.

Foster, D.R. 1988. Species and stand response to catastrophic wind in central New England, U.S.A. *Journal of Ecology* **76**: 135–151.

Foster, D.R. 2002. Insights from historical geography to ecology and conservation: lessons from the New England landscape. *Journal of Biogeography* **29**: 1269–1275.

Gauthier, S., Leduc, A., Harvey, B., Bergeron, Y., et Drapeau, P. 2001. Les perturbations naturelles et la diversité écosystémique. *Naturaliste canadien* **125**: 10–17.

Gauthier, S., Vaillancourt, M.A., Kneeshaw, D., Drapeau, P., De Grandpré, L., Claveau, Y., et Paré, D. 2008. Aménagement forestier écosystémique : Origine et fondement. In Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Leduc, A., De Grandpré, L., Kneeshaw, D., Morin, H., Drapeau, P., et Bergeron, Y. (Dir.), *Aménagement écosystémique en forêt boréale*. Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, Québec. pp. 15–40.

Girard, F., Payette, S., et Gagnon, R. 2008. Rapid expansion of lichen woodlands within the closed-crown boreal forest zone over the last 50 years caused by stand disturbances in eastern Canada. *Journal of Biogeography* **35**: 529-537.

Girard, F., Payette, S., et Gagnon, R. 2009. Origin of the lichen-spruce woodland in the closed-crown forest zone of eastern Canada. *Global Ecology and Biogeography* **18**: 291-303.

Girardin, M.P., Flannigan, M.D., Tardif, J.C., et Bergeron, Y. 2008. Climatologie, météorologie et feux de forêt. *In* Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Leduc, A., De Grandpré, L., Kneeshaw, D., Morin, H., Drapeau, P., et Bergeron, Y. (Dir.), *Aménagement écosystémique en forêt boréale*. Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, Québec. pp. 83-107.

Grove, A.T. 2001. The "Little Ice Age" and its geomorphological consequences in Mediterranean Europe. *Climatic Change* **48**: 121-136.

Hamann, A., et Wang, T. 2006. Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia. *Ecology* **87**: 2773-2786.

Hély, C., Bergeron, Y., et Flannigan, M.D. 2000. Effect of stand composition on fire hazard in mixed-wood Canadian boreal forest. *Journal of Vegetation Science* **11**: 813-824.

Hély, C., Girardin, M.P., Ali, A.A., Carcaillet, C., Brewer, S., et Bergeron, Y. 2010. Eastern boreal North American wildfire risk of the past 7000 years: A model-data comparison. *Geophysical Research Letters* **37**: L14709.

Higuera, P.E., Peters, M.E., Brubaker, L.B., et Gavin, D.G. 2007. Understanding the origin and analysis of sediment-charcoal records with a simulation model. *Quaternary Science Reviews* **26**: 1790-1809.

Hunter, M.L., Jacobson, G.L., et Webb, T. 1988. Paleoecology and the coarse-filter approach to maintaining biological diversity. *Conservation Biology* **2**: 375-385.

IPCC. 2007. *Climate change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Irland, L.C. 2000. Ice storms and forest impacts. *The Science of the Total Environment* **262**: 231-242.

Iverson, L.R., et Prasad, A.M. 1998. Predicting abundance of 80 tree species following climate change in the eastern United States. *Ecological Monographs* **68**: 465-485.

Jardon, Y., Morin, H., et Dutilleul, P. 2003. Périodicité et synchronisme des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec. *Canadian Journal of Forest Research* **33**: 1947-1961.

Jasinski, J.P.P., et Payette, S. 2005. The creation of alternative stable states in the southern boreal forest, Québec, Canada. *Ecological Monographs* **75**: 561-583.

Jetté, J.-P., Vaillancourt, M.-A., Leduc, A., et Gauthier, S. 2008. Les enjeux écologiques de l'aménagement forestier. *In* Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Leduc, A., De Grandpré, L., Kneeshaw, D., Morin, H., Drapeau, P., et Bergeron, Y. (Dir.), *L'aménagement écosystémique en forêt boréale*. Presse de l'Université du Québec, Sainte-Foy, Québec. pp. 1-10.

Johnson, E.A. 1992. *Fire and vegetation dynamics: studies from the North American boreal forest*. Cambridge University Press, Cambridge.

Kilgore, B.M. 1973. The ecological role of fire in Sierran conifer forests: Its application to National Park management. *Quaternary Research* **3**: 496-513.

Krawchuk, M.A., Cumming, S.G., Flannigan, M.D., et Wein, R.W. 2006. Biotic and abiotic regulation of lightning fire initiation in mixedwood boreal forest. *Ecology* **87**: 458-468.

LaMarche, V.C. 1973. Holocene climatic variations inferred from treeline fluctuations in the White Mountains, California. *Quaternary Research* **3**: 632-660.

Le Goff, H., Leduc, A., Bergeron, Y., et Flannigan, M. 2005. The adaptive capacity of forest management to changing fire regimes in the boreal forest of Quebec. *Forestry Chronicle* **81**: 582-592.

Le Goff, H., Flannigan, M.D., Bergeron, Y., Leduc, A., Gauthier, S., et Logan, K. 2008a. Des solutions d'aménagement pour faire face aux changements climatiques: l'exemple des feux de forêts. *In* Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Leduc, A., De Grandpré, L., Kneeshaw, D., Morin, H., Drapeau, P., et Bergeron, Y. (Dir.), *L'aménagement écosystémique en forêt boréale*. Presse de l'Université du Québec, Sainte-Foy, Québec. pp.111-131.

Le Goff, H., Girardin, M.P., Flannigan, M.D., et Bergeron, Y. 2008b. Dendroclimatic inference of wildfire activity in Quebec over the 20th century and implications for natural disturbance-based forest management at the northern limit of the commercial forest. *International Journal of Wildland Fire* **17**: 348-362.

Lussier, J.M., Morin, H., et Gagnon, R. 2002. Mortality in black spruce stands of fire or clear-cut origin. *Canadian Journal of Forest Research* **32**: 539-547.

MacDonald, G.M., Larsen, C.P.S., Szeicz, J.M., et Moser, K.A. 1991. The reconstruction of boreal forest fire history from lake sediments: A comparison of charcoal, pollen, sedimentological, and geochemical indices. *Quaternary Science Reviews* **10**: 53-71.

Messaoud, Y., Bergeron, Y., et Asselin, H. 2007. Reproductive potential of balsam fir (*Abies balsamea*), white spruce (*Picea glauca*), and black spruce (*P. mariana*) at the ecotone

between mixedwood and coniferous forests in the boreal zone of western Québec. *American Journal of Botany* **94**: 746-754.

Morin, H. 1990. Analyse dendroécologique d'une sapinière issue d'un chablis dans la zone boréale, Québec. *Canadian Journal of Forest Research* **20** : 1753-1758.

Morin, H. 1998. Importance et évolution des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans l'est du Canada : l'apport de la dendrochronologie. *Géographie physique et quaternaire* **52**: 237-244.

MRNQ. 2000. La limite nordique des forêts attribuables. Rapport final du comité, Ministère des ressources naturelles, Charlesbourg, Québec. 100 p.

Payette, S. 1992. Fires as a controlling process in the North American boreal forest. *In* Shugart, H.H., Leemans, R., et Bonan, G.B. (Dir.), *A systems analysis of the global boreal forest*. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 144-169.

Pyne, S.J. 2007. *Awful splendor: A fire history of Canada*. UBC Press, Vancouver, British Columbia. 549p.

Renkin, R.A., et Despain, D.G. 1992. Fuel moisture, forest type, and lightning-caused fire in Yellowstone National Park. *Canadian Journal of Forest Research* **22**: 37-45.

Richard, P.J.H. 1995. Le couvert végétal du Québec-Labrador il y a 6000 ans BP : essai. *Géographie physique et Quaternaire* **49**: 117-140.

Rowe, J.S., et Scotter, G.W. 1973. Fire in the boreal forest. *Quaternary Research* **3**: 444-464.

Sirois, L. 2000. Spatiotemporal variation in black spruce cone and seed crops along a boreal forest – tree line transect. *Canadian Journal of Forest Research* **30**: 900-909.

Skinner, W.R., Shabbar, A., Flannigan, M.D., Logan K. 2006. Large forest fires in Canada and the relationship to global sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research* **111**: D14106, 14PP.

Snyder, P.K., Delire, C., et Foley, J.A. 2004. Evaluating the influence of different vegetation biomes on the global climate. *Climate Dynamics* **23**: 279-302.

Soja, A.J., Tchebakova, N.M., French, N.H.F., Flannigan, M.D., Shugart, H.H., Stocks, B.J., Sukhinin, A.I., Parfenova, E.I., Chapin III, F.S., et Stackhouse, J.P.W. 2007. Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations. *Global and Planetary Change* **56**: 274-296.

Tinner, W., et Hu, F.S. 2003. Size parameters, size-class distribution and area-number relationship of microscopic charcoal: relevance for fire reconstruction. *Holocene* **13**: 291-296.

Tolonen, K. 1986. Charred particle analysis. *In* Berglund, B.E. (Dir.) Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology. John Wiley & Sons Ltd, New York. pp. 485-496

Turner, M.G., Romme, W.H., Gardner, R.H., O'Neill, R.V., et Kratz, T.K. 1993. A revised concept of landscape equilibrium: Disturbance and stability on scaled landscapes. *Landscape Ecology* **8**: 213-227

Turner, M.G., Baker, W.L., Peterson, C.J., et Peet, R.K. 1998. Factors influencing succession: Lessons from large, infrequent natural disturbances. *Ecosystems* **1**: 511-523.

Viau, A.E., Gajewski, K., Sawada, M.C., et Fines, P. 2006. Millennial-scale temperature variations in North America during the Holocene. *Journal of Geophysical Research* **111**: D09102.

Walker, D.A., Halfpenny, J.C., Walker, M.D., et Wessman, C.A. 1993. Long-term studies of snow-vegetation interactions. *BioScience* **43**: 287-301.

Walsh, M.K., Whitlock, C., et Bartlein, P.J. 2008. A 14,300-year-long record of fire-vegetation-climate linkages at Battle Ground Lake, southwestern Washington. *Quaternary Research* **70**: 251-264.

Weber, M.G., et Flannigan, M.D. 1997. Canadian boreal forest ecosystem structure and function in a changing climate: impact on fire regimes. *Environmental Reviews* **5**: 145-166.

Whitlock, C., Skinner, C.N., Bartlein, P.J., Minckley, T., et Mohr, J.A. 2004. Comparison of charcoal and tree-ring records of recent fires in the eastern Klamath Mountains, California, USA. *Canadian Journal of Forest Research* **34**: 2110-2121.

Wiles, G.C., Barclay, D.J., et Calkin, P.E. 1999. Tree-ring-dated 'Little Ice Age' histories of maritime glaciers from western Prince William Sound, Alaska. *The Holocene* **9**: 163-173.

Woodward, F.I. 1987. *Climate and plant distribution*. Cambridge University Press, Cambridge.

Zarnovican, R. 2002. Impact du verglas de 1998 dans une érablière à bouleau jaune en Estrie : Situation après trois ans. *Forestry Chronicle* **78**: 415-421.

## CHAPITRE II

VARIATIONS DU RÉGIME DES FEUX EN RÉPONSE AUX CHANGEMENTS  
CLIMATIQUES HOLOCÈNES À LA LIMITE NORDIQUE DE LA FORÊT  
COMMERCIALE AU QUÉBEC

Ahmed El Guellab.

*Chaire industrielle CRSNG-UQAT-UQAM en aménagement forestier durable*, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445 boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4, Canada.

[Ahmed.El-Guellab@uqat.ca](mailto:Ahmed.El-Guellab@uqat.ca)

Hugo Asselin.

*Chaire industrielle CRSNG-UQAT-UQAM en aménagement forestier durable*, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445 boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4, Canada.

[Hugo.Asselin@uqat.ca](mailto:Hugo.Asselin@uqat.ca)

Adam A. Ali.

*Centre de Bio-Archéologie et Écologie* (UMR5059, CNRS, UM2, EPHE), Université Montpellier 2, Institut de Botanique, 163 rue Auguste Broussonet, 34090, Montpellier, France.

*Chaire industrielle CRSNG-UQAT-UQAM en aménagement forestier durable*, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445 boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Québec, J9X 5E4, Canada

[ali@univ-montp2.fr](mailto:ali@univ-montp2.fr)

## 2.1 Résumé

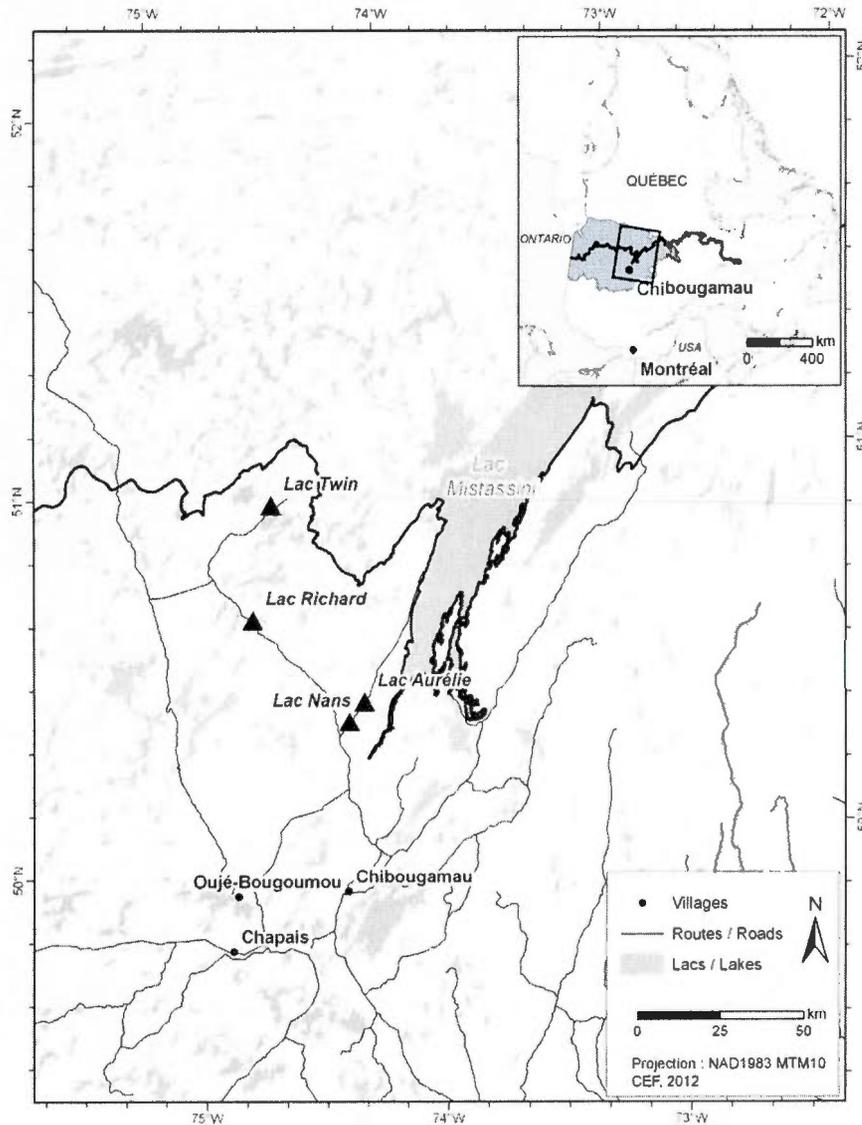
Les feux sont la principale source de perturbation naturelle dans la forêt boréale. Le climat a connu plusieurs fluctuations au cours des derniers millénaires qui ont influencé le régime des feux. Le régime des feux et l'influence du climat sur celui-ci est encore peu documenté à la limite nordique de la forêt commerciale québécoise, à une large échelle spatio-temporelle. La présente étude avait pour objectif de reconstituer l'historique des feux et d'évaluer l'impact des grands changements climatiques holocènes sur le régime des feux à la limite nordique de la forêt boréale commerciale au Québec. Une reconstitution de l'historique des feux a été réalisée par l'analyse des charbons de bois préservés dans les sédiments de quatre lacs situés au nord de la ville de Chibougamau (ca. 49° N; 74° O). Les médianes et les distributions des intervalles entre les feux de chaque site ont été comparées, le synchronisme des événements de feu a aussi été évalué pour déduire le rôle du climat régional et des facteurs locaux sur les variations du régime des feux. Les feux ont été moins fréquents durant les quatre derniers millénaires comparativement à l'Holocène moyen (7000 à 4000 cal. BP). Le nombre de feux par millénaire a connu des augmentations importantes durant les périodes chaudes, surtout durant l'Optimum climatique holocène et l'Optimum climatique médiéval. Le climat régional n'est pas le seul principal facteur qui a influencé le régime des feux à l'échelle séculaire ou millénaire. Les facteurs locaux (non climatiques) ont également eu un effet sur le régime des feux en agissant notamment sur la probabilité de déclenchement des feux. Les changements du régime des feux identifiés dans la région d'étude depuis quelques siècles demeurent encore à l'intérieur de la variabilité naturelle à l'échelle de l'Holocène. Cependant, l'occurrence des feux pourrait augmenter sous l'effet du réchauffement climatique en cours. Ajoutés aux coupes, ces feux pourraient entraîner l'écosystème à l'extérieur de sa variabilité naturelle, à moins que les stratégies d'aménagement forestier ne soient adaptées.

## 2.2 Introduction

Le réchauffement climatique, dont les impacts sont plus accentués aux latitudes élevées (IPCC 2007), affectera à long terme le fonctionnement de la forêt boréale nord-américaine, avec potentiellement des transformations profondes de la végétation (Hamann et Wang 2006; Soja et al. 2007), dont la dynamique spatiale et temporelle est surtout contrôlée par les feux (Payette 1992). Certaines prédictions mettent en perspective une augmentation de la fréquence des feux et des surfaces brûlées à l'est de la forêt boréale canadienne (Bergeron et al. 2010), avec des impacts environnementaux et socio-économiques importants, liés à la perte de ressources forestières (Weber et Flannigan 1997; Dale et al. 2001; Flannigan et al. 2005). Au sud de la Baie James (Québec), dans la zone nordique de la pessière à mousses, les interactions entre les perturbations naturelles et les activités forestières peuvent affecter l'intégrité écologique des écosystèmes, avec notamment une transformation de la pessière à mousses en pessière à lichens (Girard et al. 2009). Les travaux de recherche retraçant l'historique des feux de forêt au sein de la pessière à mousses soulignent l'importance des oscillations climatiques (Girardin et al. 2004; LeGoff et al. 2007; Hély et al. 2010) et des facteurs locaux (Ali et al. 2009a), tels que les dépôts de surface (Mansuy et al. 2010). Les zones les mieux drainées sont le siège d'une fréquence de feux plus importante (Mansuy et al. 2010). Afin de mieux évaluer l'impact des changements climatiques en cours sur la dynamique des feux de forêt au sein de la pessière à mousses, et de continuer à pouvoir y adosser une activité socio-économique durable préservant les fonctionnalités écologiques, il est indispensable d'optimiser notre connaissance de la variabilité naturelle des feux.

Le premier objectif de cette étude est de retracer la variabilité naturelle de la fréquence des feux au cours de l'Holocène au sein de la pessière à mousses, à la limite nordique d'exploitation forestière du Québec. Le deuxième objectif est d'évaluer l'impact des grandes fluctuations climatiques holocènes sur ce régime de perturbation, notamment l'Optimum climatique holocène et l'Optimum climatique médiéval. Le territoire d'étude est le siège de discussions alimentées, d'une part, par l'industrie forestière qui souhaite déployer plus au nord ses activités et, d'autre part, par les environnementalistes qui souhaiteraient plutôt un repli vers le sud de la limite nordique. La zone d'étude est dépourvue de reconstitution holocène de la fréquence des feux et il est donc impossible de dresser un panorama de la variabilité

naturelle au-delà de 300 ans (LeGoff et al. 2007). Pour pallier ce manque de donnée et apporter des éléments de réponse quant à l'évolution de la fréquence des feux durant les prochaines décennies en réponse à l'augmentation des températures, une étude paléoécologique a été réalisée, fondée sur l'analyse à haute résolution temporelle de charbons de bois préservés dans quatre (4) petits lacs (< 4 ha), localisés au nord de la ville de Chibougamau (Fig. 1). La proximité géographique des sites nous a permis d'évaluer la variabilité régionale de la fréquence des feux au regard des principales oscillations climatiques de l'Holocène. Compte tenu de cette proximité spatiale, nous avons émis comme hypothèse que les sites présenteraient une histoire comparable des feux, sous une influence majeure du climat. Dans le cas contraire, cela impliquerait une incidence de facteurs locaux dans la dynamique spatiale et temporelle des feux.



**Figure 2.1 : Localisation des quatre lacs échantillonnés, à la limite nordique de la forêt commerciale (ligne noire). La zone en gris foncé dans l'encadré représente le sous-domaine bioclimatique de la pessière à mousses de l'Ouest.**

## 2.3 Matériel et méthodes

### 2.3.1 Aire d'étude

L'étude a été réalisée dans la forêt boréale coniférienne, dans le sous-domaine bioclimatique de la pessière à mousses de l'Ouest (Saucier et al. 1998). L'épinette noire

(*Picea mariana* (Mill.) BSP) domine la végétation régionale depuis la vidange du lac Ojibway il y a 8200 cal. BP (Barber et al. 1999). La moyenne annuelle des précipitations est de 961,4 mm et la moyenne des températures est de -0,4 C° (Environnement Canada 2011). Des travaux dendrochronologiques réalisés essentiellement dans des forêts de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) aux sols très bien drainés mettent en évidence pour les 200 dernières années un cycle de feux variant entre 130 et 150 ans (LeGoff et al. 2007), avec une augmentation du cycle de feux après 1940. Cette étude a montré l'importance des oscillations de la PDO (*Pacific Decadal Oscillation*) dans la dynamique des feux avec plus d'activité de feux durant les phases de PDO positive.

### 2.3.2 Échantillonnage

Les quatre lacs sélectionnés sont situés à moins de 100 km l'un de l'autre et présentent des caractéristiques comparables (Tableau 1): petite taille, absence d'affluent et d'effluent, bassins versants ayant le même type de configuration et pratiquement la même végétation au niveau local. L'échantillonnage a été réalisé en mars 2009.

**Tableau 2.1: Caractéristiques des lacs échantillonnés.**

	Lac Nans	Lac Richard	Lac Aurélie	Lac Twin
Latitude	50°22'07.09''N	50°38'69.85''N	50°25'06.60''N	50°56'68.91''N
Longitude	74°18'21.32''O	74°40'69.90''O	74°13'67.61''W	74°33'91.20''W
Altitude	431 m	432 m	428 m	376 m
Profondeur	500 cm	528 cm	565 cm	571 cm
Végétation arborée locale dominante	Épinette noire ( <i>Picea mariana</i> ) et bouleau blanc ( <i>Betula papyrifera</i> )	Forêt brûlée d'épinette noire ( <i>Picea mariana</i> ) et pin gris ( <i>Pinus banksiana</i> )	Épinette noire ( <i>Picea mariana</i> ) et pin gris ( <i>Pinus banksiana</i> )	Épinette noire ( <i>Picea mariana</i> ) et pin gris ( <i>Pinus banksiana</i> )

Des carottes de sédiments lacustres ont été prélevées au point le plus profond de chaque lac à l'aide de deux carottiers. D'abord, un carottier de type Kajak-Brinkhurst (KB) a été utilisé pour prélever les sédiments de surface, au contact avec l'eau. Pour les sédiments plus profonds, un carottier Livingstone a été utilisé. Les carottes prélevées ont par la suite été sous-échantillonnées à tous les 0,5 cm d'épaisseur pour maximiser la résolution temporelle. Ces sous-échantillons ont été conservés dans des sacs de plastique placés au réfrigérateur à 4 °C jusqu'au moment des analyses.

### 2.3.3 Quantification des charbons de bois

Un volume de 1 cm<sup>3</sup> prélevé de chaque sous-échantillon a été laissé à tremper dans une solution déflocculante d'hexamétophosphate de sodium ((NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>) à 3 % pendant au moins 48 heures sur une plaque chauffante réglée à 100°C. Ensuite, le mélange a été tamisé à 150 µm sous un courant d'eau douce (Carcaillet et al. 2001b). Les refus de tamis ont été lavés avec une solution de NaOCl à 10 %, ce qui a permis de blanchir la matière organique noire afin de la distinguer plus aisément des charbons de bois. Les particules de charbon de bois de taille supérieure à 150 µm sont rarement transportées à plus de 1 km de l'incendie et représentent par conséquent les feux locaux (Wein et al. 1987). La quantification des particules de charbons de bois a été réalisée à l'aide d'une loupe binoculaire (20 ×) équipée d'une caméra digitale, couplée à un logiciel d'analyse d'images (Winseedle, Regent Instruments Inc., Canada).

### 2.3.4 Datations au radiocarbone

Des datations <sup>14</sup>C par spectroscopie de masse par accélérateur (SMA) ont été obtenues pour différents niveaux des profils sédimentaires. Puisque les macrorestes étaient très peu abondants, la majorité des datations ont été réalisées sur les sédiments lacustres (gyttja). Toutes les datations ont été calibrées en utilisant le programme CALIB version 6.0.1 (Stuiver et Reimer, 1993). Les modèles âge/profondeur ont été produits en utilisant le logiciel MCAgeDepth 0.1 disponible gratuitement sur <http://code.google.com/p/mcagedepth/> (Higuera et al. 2008).

### 2.3.5 Reconstitution des événements de feux

La concentration en charbons de bois a été déterminée pour chaque sous-échantillon en divisant la surface des particules par le volume ( $1 \text{ cm}^3$ ). Le taux d'accumulation de charbons de bois (CHAR) ou influx (exprimé en  $\text{mm}^2 \text{ cm}^{-2} \text{ an}^{-1}$ ) a été calculé en multipliant la concentration par le taux de sédimentation ( $\text{cm an}^{-1}$ ) (Whitlock et Anderson 2003). Afin d'éviter une éventuelle influence des variations sédimentaires intra et inter sites, des taux de sédimentation constants (20 ans, la moyenne des quatre lacs) ont été utilisés pour l'ensemble des lacs.

Les séries de CHAR peuvent être décomposées en deux composantes : (1) les particules qui se sont accumulées pendant des épisodes de feu survenus à proximité du lac ( $\text{CHAR}_{\text{peak}}$ ; signal à haute fréquence) et (2) les particules accumulées au cours de périodes sans feu à proximité du lac ( $\text{CHAR}_{\text{background}}$ ; bruit de fond, signal à basse fréquence). Le bruit de fond peut refléter le transport à longue distance des charbons de bois, un changement dans la composition végétale (ou l'accumulation du combustible) qui influence la production de charbon, le transport secondaire (Whitlock et Anderson 2003; Higuera et al. 2007), le mélange de sédiments (Higuera et al. 2007) ou un changement de comportement des feux (Gavin et al. 2006). Le signal  $\text{CHAR}_{\text{background}}$  a été modélisé et soustrait des séries CHAR en utilisant une fonction LOWESS avec des fenêtres temporelles de 800-900 ans. Le signal  $\text{CHAR}_{\text{peak}}$  ainsi obtenu est composé de deux sous-populations gaussiennes : (1)  $C_{\text{noise}}$ , qui reflète la variabilité due à l'échantillonnage des sites, au bruit inhérent aux analyses statistiques et numériques opérées et à la partie du bruit de fond qui n'aurait pas été enlevée à l'étape précédente; et (2)  $C_{\text{fire}}$ , qui représente l'occurrence d'un ou plusieurs feux locaux (Gavin et al. 2006; Higuera et al. 2007, 2008). La composante  $C_{\text{fire}}$  a été séparée de  $C_{\text{noise}}$  en appliquant un seuil correspondant au 99<sup>e</sup> percentile de la distribution de  $C_{\text{noise}}$ . Le choix des fenêtres de déplacement pour la modélisation de  $\text{CHAR}_{\text{background}}$  a été dicté par l'approche permettant de modéliser et séparer aux mieux les deux sous populations gaussiennes de  $\text{CHAR}_{\text{peak}}$  (Ali et al. 2009b; Higuera et al. 2009; Kelly et al. 2011).

Les analyses ont été faites à l'aide du logiciel CharAnalysis 1.1 (<http://sites.google.com/site/charanalysis/>). L'occurrence des feux est exprimée en nombre de feux par 1000 ans, lissée avec une fenêtre mobile de 100 ans en utilisant le logiciel K1D

version 1.2 (<http://geography.uoregon.edu>). L'intervalle entre les feux (Fire Return Interval : FRI) a été obtenu en comptant le nombre d'années entre les événements successifs. La courbe composite de l'occurrence des feux à l'échelle régionale a été obtenue en calculant la moyenne des quatre sites, avec un intervalle de confiance Bootstrap à 95 % (logiciel SAS).

### 2.3.6 Comparaison des régimes de feux des quatre lacs

Pour comparer les historiques des feux des quatre sites, les valeurs médianes et la distribution des FRI ont été comparées en utilisant les tests statistiques non paramétriques de Kruskal-Wallis et de Kolmogorov-Smirnov, respectivement (Clark 1989; Ali et al., 2009a). Pour compléter l'analyse de comparaison, le synchronisme des épisodes de feux reconstitués pour chacun des sites a été évalué en calculant la fonction  $K$  de Ripley (Ripley 1977) modifiée pour ne tenir compte que de la seule dimension temporelle (Doss 1989). Pour faciliter les analyses, la fonction  $K$  a été transformée en fonction  $L$ , tel que suggéré par Gavin *et al.* (2006). La fonction  $L$  permet de comparer les événements de feu ayant eu lieu dans une fenêtre temporelle définie. Cette comparaison a pour but de mettre en évidence à l'échelle séculaire ou millénaire le synchronisme, l'indépendance ou l'asynchronisme des événements. Des intervalles de confiance à 95 % et 99 % ont été définis par randomisation de 1000 événements. Les valeurs de  $L$  dépassant l'intervalle de confiance au-dessus de zéro ont été interprétées comme reflétant un synchronisme entre les événements. Les valeurs de  $L$  à l'intérieur de l'intervalle de confiance ont été interprétées comme indiquant des événements indépendants. Les valeurs de  $L$  dépassant l'intervalle de confiance en-dessous de zéro ont été interprétées comme reflétant un asynchronisme entre les événements. Les analyses statistiques ont été faites à l'aide des logiciels SAS, STATISTICA et K1D version 1.2.

## 2.4 Résultats

### 2.4.1 Modèles âge-profondeur et fluctuation du CHAR

Les datations obtenues à différentes profondeurs pour les quatre lacs sont présentées au tableau 2 et les modèles âge-profondeur sont présentés à la figure 2. Pour les quatre lacs, les accumulations sédimentaires représentent les derniers 8000 ans.

**Tableau 2.2 : Datations au radiocarbone obtenues pour chacun des lacs (Beta = Beta Analytic Inc.; Poz = Poznan Radiocarbon Laboratory; SacA = Laboratoire de mesure du carbone 14)**

Site et profondeur (cm)	Date conventionnelle années 14C BP $\pm 2$ sigma	Probabilité médiane (Étendue de calibration) années Cal BP	Matériel	Code de laboratoire
Lac Richard				
0-5	560 $\pm$ 30	510 (530-490)	Gyttja	Beta-293916
20-25	1220 $\pm$ 30	1075 (1170-980)	Gyttja	Beta-293917
80-81	3800 $\pm$ 30	2325 (4230-420)	Gyttja	Beta-293911
97-98	4870 $\pm$ 40	5535 (5600-5470)	Gyttja	Beta-293912
131-132	6770 $\pm$ 40	7520 (7580-7460)	Gyttja	Beta-293913
149-150	6820 $\pm$ 40	7585 (7620-7550)	Gyttja	Beta-293914
159-160	7560 $\pm$ 40	8265 (8350-8180)	Gyttja	Beta-293915
Lac Nans				
20-25	1200 $\pm$ 40	1075 (1180-970)	Gyttja	Beta-275126
30-35	1820 $\pm$ 30	1675 (1740-1610)	Gyttja	Beta-298239
50-51	3290 $\pm$ 40	3480 (3570-3390)	Gyttja	Beta-267031
100-101	4040 $\pm$ 40	4555 (4560-4550)	Gyttja	Beta-267032
130-131	4630 $\pm$ 40	5420 (5460-5380)	Gyttja	Beta-298237
150-151	4040 $\pm$ 40	4490 (4570-4410)	Gyttja	Beta-267033
150-151	4720 $\pm$ 40	5555 (5570-5540)	Gyttja	Beta-298238
170-171	5230 $\pm$ 40	5950 (6000-5900)	Gyttja	Beta-267034
212-213	7800 $\pm$ 40	8505 (8600-8410)	Gyttja	Beta-267035
Lac Aurélie				
43-44	2870 $\pm$ 30	3007 (2879-3136)	Macrorestes	Poz-35983
111-112	3990 $\pm$ 35	4443 (4319-4568)	Macrorestes	Poz-35984
163-164	4750 $\pm$ 35	5457 (5329-5586)	Macrorestes	Poz-36014
220-221	6140 $\pm$ 40	7047 (6931-7163)	Macrorestes	Poz-36016
236-237	6490 $\pm$ 40	7396 (7317-7476)	Macrorestes	Poz-36017
326-327	7460 $\pm$ 50	8279 (8185-8373)	Macrorestes	Poz-36018
Lac Twin				
24-25	2415 $\pm$ 30	2436 (2357-2679)	Gyttja	SacA16557
54-55	3615 $\pm$ 30	3923 (3848-4056)	Gyttja	SacA16556
74-75	4105 $\pm$ 30	4625 (4480-4806)	Gyttja	SacA16555
94-95	4340 $\pm$ 30	4906 (4851-5019)	Gyttja	SaA16554
114-115	4435 $\pm$ 30	5028 (4892-5264)	Gyttja	SacA16553
134-135	5245 $\pm$ 30	5988 (5931-6169)	Gyttja	SacA16552
164-165	6285 $\pm$ 30	7215 (7166-7267)	Gyttja	SacA16551
180-181	6910 $\pm$ 50	7742 (7654-7866)	Macrorestes	Poz-32158
183-184	7625 $\pm$ 45	8419 (8368-8531)	Gyttja	SacA16550

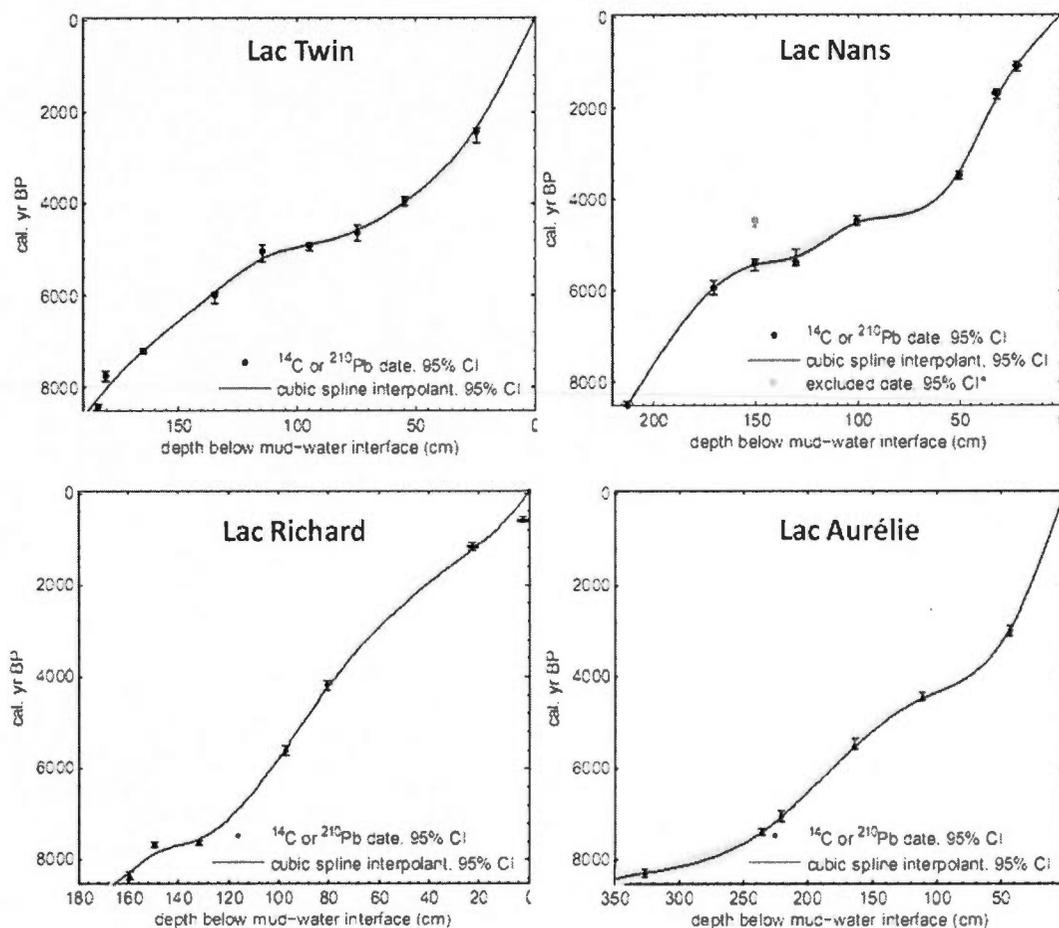


Figure 2.2 : Modèles âge-profondeur pour les quatre lacs étudiés.

Les CHAR ont été très variables durant tout l'Holocène pour l'ensemble des lacs étudiés. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées au lac Nans, avec un maximum de  $15 \text{ mm}^2 \text{ cm}^{-2} \text{ an}^{-1}$  (Fig. 3 (C-a)), suivi du lac Richard ( $3 \text{ mm}^2 \text{ cm}^{-2} \text{ an}^{-1}$ ) (Fig. 3 (B-a)) et des lacs Twin et Aurélie ( $0,6$  et  $0,3 \text{ mm}^2 \text{ cm}^{-2} \text{ an}^{-1}$ ) (Fig. 3 (D-a) (A-a)). Les quatre lacs ont montré des CHAR plus élevés à l'Holocène moyen ca. 7000-3500 cal. BP (Fig. 3). Des valeurs élevées de CHAR ont également été observées au lac Richard vers 1000 cal. BP et au lac Aurélie pendant la période récente (ca. 500-0 cal. BP) (Fig. 3).

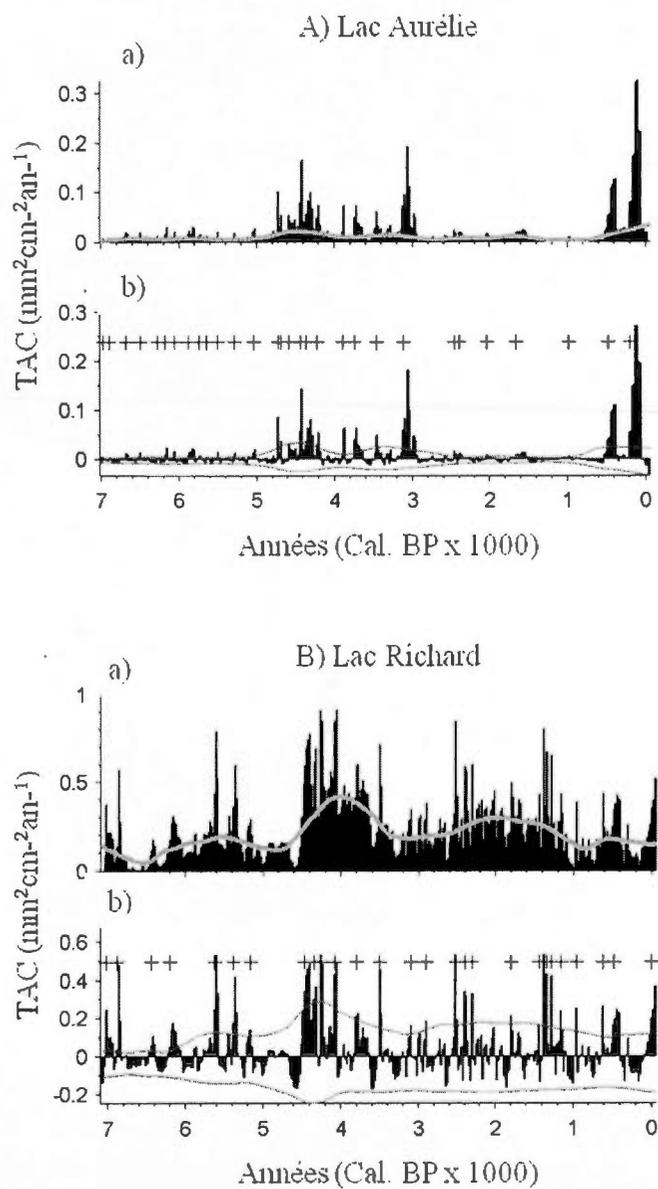


Figure 2.3 : Taux d'accumulation de charbon (TAC = CHAR) pour les lacs Aurélie, Richard, Nans et Twin (A-a, B-a, C-a, D-a). La ligne grise représente le bruit de fond. Les pics de feux déduits après avoir enlevé le bruit de fond sont également présentés (A-b, B-b, C-b, D-b). Les lignes rouges sont les valeurs seuils déterminant le  $C_{noise}$ . Les « + » indiquent les événements de feu détectés.

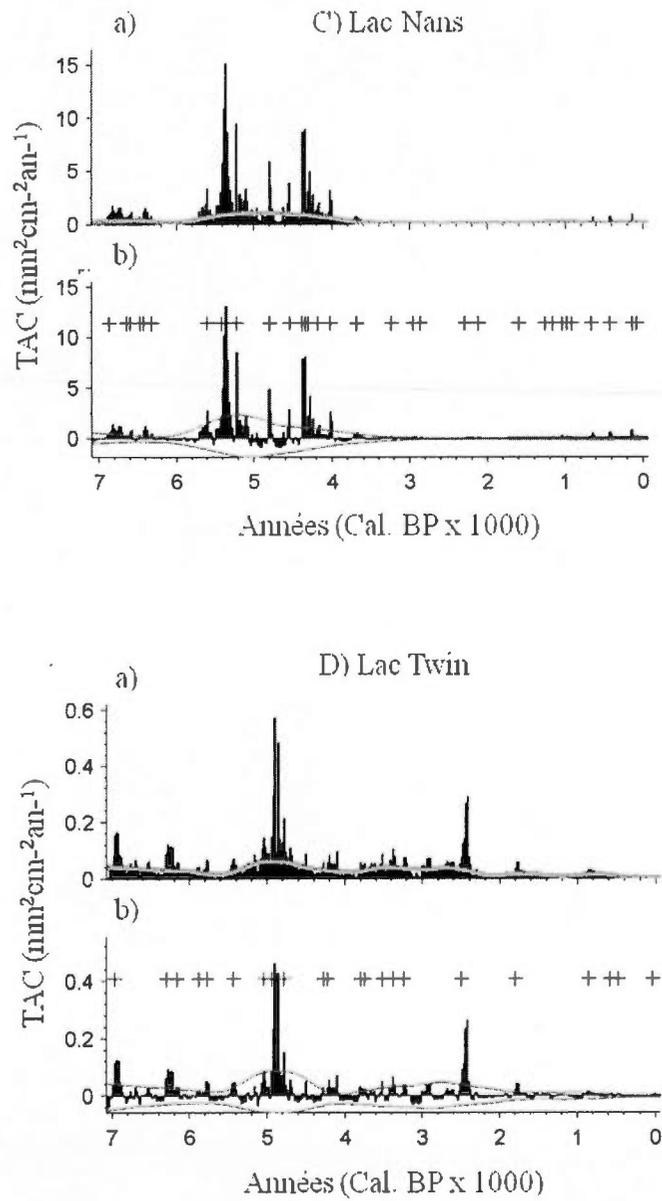


Figure 2.3 : Suite et fin

### 2.4.2 Reconstitution des feux

Le nombre total d'événements de feu détectés pour la période Holocène a été de 23 au lac Twin, 26 au lac Richard, 30 au lac Aurélie et 32 au lac Nans (Fig. 3). L'occurrence des feux (nombre de feux par 1000 ans) a varié différemment à chaque lac au cours de l'Holocène (Fig. 4). Au lac Nans, l'occurrence des feux était plus élevée entre 5000 et 3800 cal. BP et aux alentours de 1000 cal. BP (Fig. 4). Au lac Richard, l'occurrence des feux était plus élevée entre 4600 et 3600 cal. BP, ainsi qu'entre 1400 et 800 cal. BP (Fig. 4). Au lac Aurélie, la majorité des événements de feu ont eu lieu avant 3400 cal. BP. Les occurrences les plus élevées ont été enregistrées entre 6800 et 4000 cal. BP (Fig. 4). Au lac Twin, l'occurrence des feux a été plus élevée avant 3200 cal. BP (Fig. 4). En général, pour les quatre lacs, les feux étaient plus fréquents dans la période 7000-3500 cal. BP que pour les derniers 3500 ans.

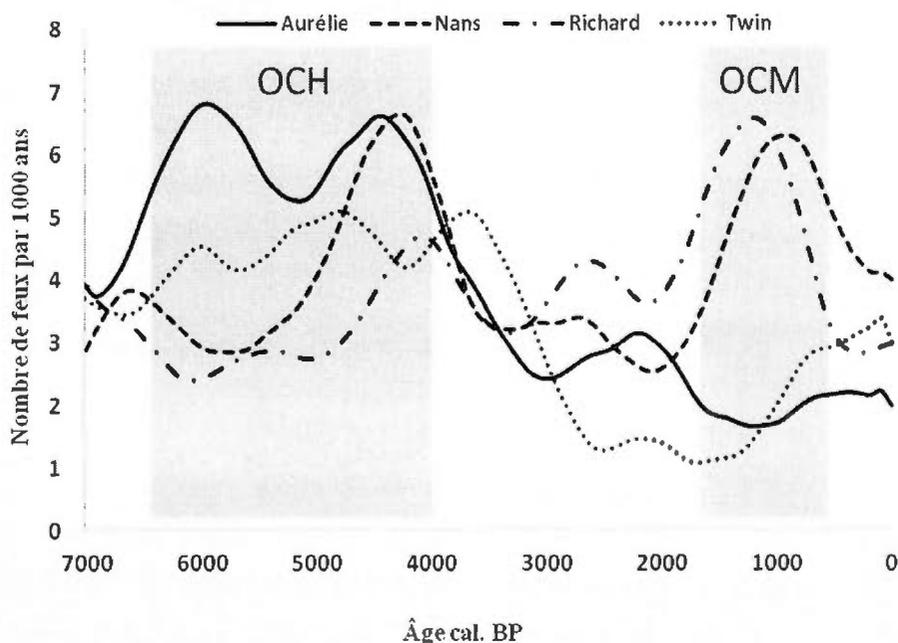


Figure 2.4: Occurrence des feux exprimée par le nombre d'événements de feu par 1000 ans pour les lacs Aurélie, Nans, Richard et Twin. Les rectangles gris représentent l'Optimum climatique holocène (OCH) et l'Optimum climatique médiéval (OCM).

La courbe composite de l'occurrence régionale des feux montre que les événements étaient plus fréquents avant 4000 cal. BP. Après cette période, l'occurrence a connu une

chute importante entre 4000 et 2000 cal. BP, pour augmenter brièvement aux alentours de 1000 cal. BP, avant de diminuer à nouveau vers les valeurs actuelles (Fig. 5).

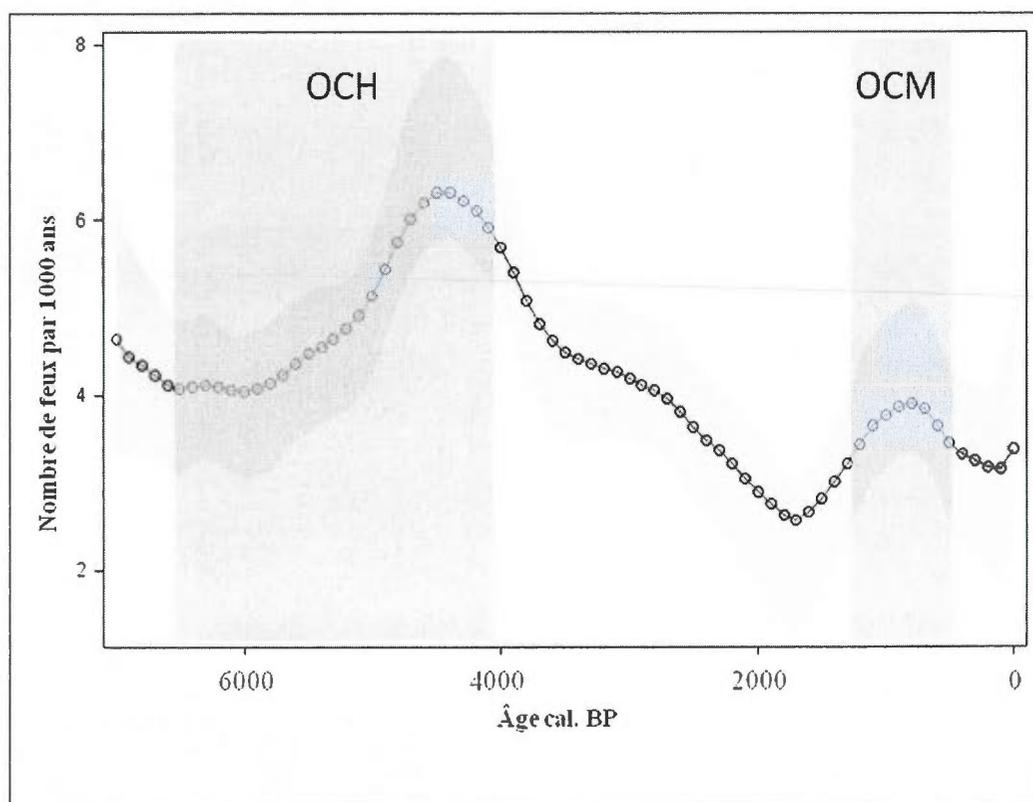


Figure 2.5: Moyenne régionale de l'occurrence des feux calculée à partir de celles des quatre lacs. L'intervalle de confiance à 95 % est représenté en bleu. Les rectangles gris représentent l'Optimum climatique holocène (OCH) et l'Optimum climatique médiéval (OCM)

#### 2.4.3 Comparaison des régimes de feux des quatre lacs

Les valeurs médianes des intervalles entre les feux (FRI) n'étaient pas significativement différentes entre les lacs (test de Kruskal-Wallis,  $\alpha = 0,05$ ), et ce, autant pour la totalité de la période à l'étude (7000-0 cal. BP) que pour l'Holocène moyen (7000-3500 cal. BP) ou supérieur (3500-0 cal. BP) (Tableau 3). Cela dit, la différence entre les valeurs médianes des intervalles entre les feux était près d'être significative pour l'Holocène supérieur.

**Tableau 2.3: Comparaison des valeurs médianes des intervalles entre les feux (FRI) (test de Kruskal-Wallis) pour les quatre lacs étudiés.**

	Valeur du test de Kruskal-Wallis ( $\alpha = 0,05$ )	Valeur $p$ du test
7000-0 cal. BP	H (3, N = 109) = 2,007	0,571
7000-3500 cal. BP	H (3, N = 62) = 4,702	0,195
3500-0 cal. BP	H (3, N = 43) = 7,631	0,054

Excepté pour les sites Aurélie et Richard pour la période 7000-3500 cal. BP, les distributions de FRI n'étaient pas significativement différentes entre les lacs (test de Kolmogorov-Smirnov,  $\alpha = 0,05$ ), et ce, peu importe la période considérée (Tableau 4).

**Tableau 2.4: Comparaison de la distribution des intervalles entre les feux (FRI) (test de Kolmogorov-Smirnov,  $\alpha = 0,05$ ) pour les quatre lacs étudiés (A = Aurélie; N = Nans; R = Richard; T = Twin).**

Lacs	7000-0 cal. BP		7000-3500 cal. BP		3500-0 cal. BP	
	Valeur du test de KS	Valeur $p$ du test	Valeur du test de KS	Valeur $p$ du test	Valeur du test de KS	Valeur $p$ du test
A-N	0,557	0,915	0,846	0,472	0,818	0,515
A-R	1,263	0,082	1,487	0,024	0,544	0,928
A-T	1,062	0,209	1,070	0,202	0,901	0,391
N-R	1,107	0,172	1,119	0,163	0,837	0,485
N-T	1,006	0,263	0,698	0,714	0,985	0,286
R-T	0,678	0,747	0,838	0,484	0,914	0,373

L'analyse de synchronisme montre toutefois que les événements de feu se sont produits globalement de façon indépendante entre les lacs au cours de l'Holocène (Fig. 6).

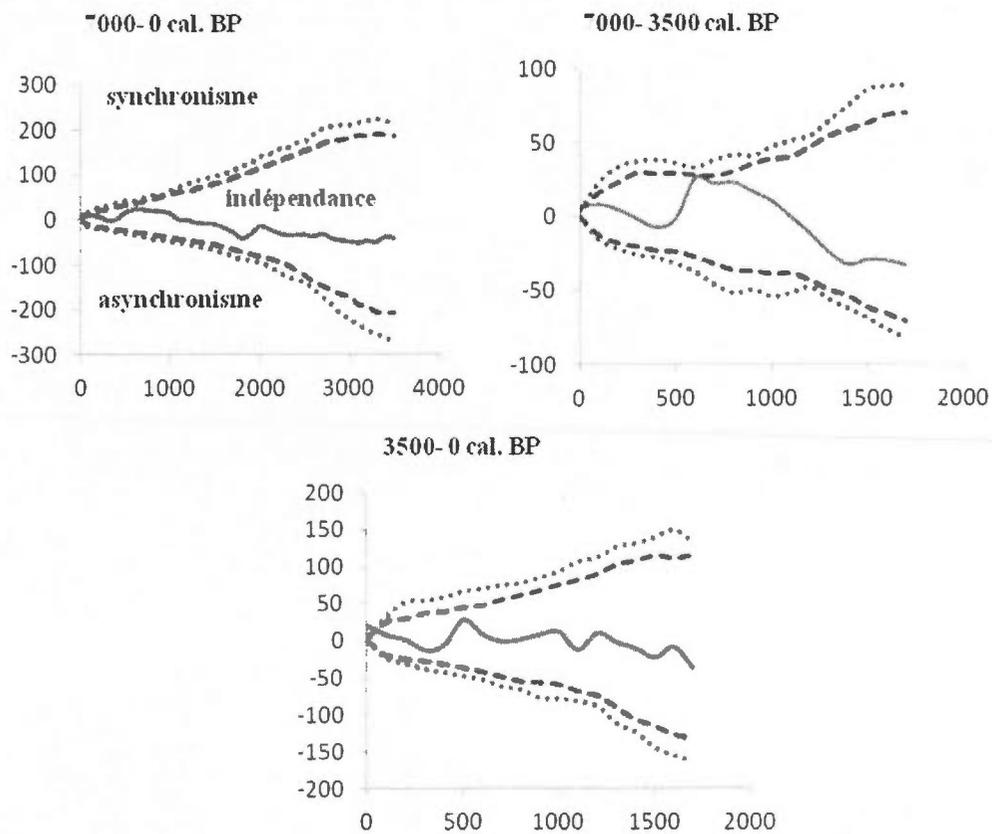


Figure 2.6: Analyses du synchronisme des événements de feu détectés aux lacs Aurélie, Nans, Richard et Twin. La ligne bleue présente la fonction L et les lignes pointillées rouges correspondent à l'intervalle de confiance à 95 % et 99 %.

## 2.5 Discussion

Le régime des feux à la limite nordique de la forêt commerciale québécoise a connu plusieurs variations durant les derniers 7000 ans. La zone d'étude a connu une plus grande fréquence de feu entre 7000 et 3500 cal. BP. La période 3500-0 cal. BP est caractérisée par une diminution importante de la fréquence des feux. L'hypothèse de travail n'est pas confirmée : le climat n'est pas le seul facteur qui a contrôlé le patron régional de la fréquence des feux depuis la déglaciation. En effet, l'absence de synchronisme entre les sites dans les événements de feu souligne le poids non négligeable des facteurs locaux (structuration du combustible, humidité au sol etc.) dans le déclenchement des feux. L'influence des facteurs locaux pourrait par ailleurs avoir été plus importante à l'Holocène supérieur (3500-0 cal. BP) qu'à l'Holocène moyen (7000-3500 cal. BP) (Tableau 3). Autrement dit, la fréquence des feux est comparable entre les sites, mais les facteurs locaux masquent l'influence du climat sur un ou tous les sites (Gavin et al., 2006; Ali et al. 2009a). Dans la mesure où les sites présentent des propriétés physiques comparables (taille du lac, superficie du bassin versant, type de sol et couvert végétal), il est possible d'émettre l'hypothèse que des variations au niveau local de la structuration du combustible (connectivité entre les massifs forestiers), couplées à des fluctuations des conditions d'humidité édaphique ont influencé différemment le déclenchement et la propagation des feux à chaque site. Des travaux supplémentaires seront nécessaires pour vérifier cette hypothèse.

Selon les reconstitutions climatiques holocènes réalisées à l'échelle de l'Amérique du Nord et fondées sur plusieurs types de proxies (Garralla et Gajewski 1992; Bartlein et al. 1998; Muller et al. 2003; Viau et al. 2006), la période 7000-3500 cal. BP a été caractérisée par un climat plus chaud et globalement plus sec. Durant cette période, les FRI dans la zone d'étude oscillaient entre 250 et 166 ans, autrement dit 4-6 feux/1000 ans (Fig. 5). Le même patron de fréquence de feux a été décrit plus au sud dans la pessière à mousses (Ali et al. 2009a). Cette période de haute fréquence des feux résulte d'une saison de feux beaucoup plus longue rythmée par une insolation estivale plus marquée et un climat plus sec, comparativement à la période 3500-0 cal. BP (Hély et al., 2010). Durant l'Holocène moyen, la zone d'étude était caractérisée par une végétation ouverte dominée par le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.) et les épinettes (*Picea* spp.) (Garralla et Gajewski 1992). Cependant, une

densification de la végétation semble s'être opérée entre 5500 et 4300 cal. BP (Garralla et Gajewski 1992; Richard 1995) avec la prédominance du bouleau à papier qui indique une augmentation de la température et des conditions de sécheresse.

La période 4000-3000 cal. BP est caractérisée dans la plupart des lacs du nord-est de l'Amérique du Nord par une augmentation du niveau d'eau sous l'effet d'un changement dans la circulation atmosphérique qui a entraîné un climat plus frais et plus humide (Harrison 1989; Carcaillet et Richard 2000; Lavoie et Richard 2000). Cette période, nommée Néoglaciale, a été répertoriée dans tout le Québec, surtout au nord du 49°N (Filion 1984; Allard et Seguin 1987; Robitaille et Allard 1996). Les résultats présentés ici mettent en évidence que cette variation du climat s'est soldée par une diminution marquée de la fréquence des feux avec des FRI oscillant aux alentours de 350 ans, i.e 3 feux/1000 ans (Fig. 5). Cette diminution est le résultat du raccourcissement de la saison de feux en lien avec la diminution de l'insolation estivale et l'augmentation des précipitations (Hély et al., 2010). Ce refroidissement du climat se matérialise dans notre zone d'étude par un redéploiement des formations dominées par les épinettes, associées à des sous-bois tapissés de sphaignes (Garralla et Gajewski 1992). L'occurrence des feux est restée relativement faible tout au long des derniers 3500 ans, comparativement à la période précédente, sauf pour la période centrée autour de 1000 cal. BP, qui coïncide avec l'Optimum climatique médiéval (Gajewski 1988; Hunt 2006) où le FRI moyen est d'environ 200 ans (4 feux/1000 ans). Cette augmentation de l'occurrence des feux a surtout été enregistrée aux lacs Nans et Richard. Le même type d'enregistrement a été observé aux lacs Profond et Raynald situés plus à l'ouest (Ali et al. 2009a). Une augmentation significative de la fréquence des feux a également été rapportée dans l'ouest américain pour la même période (Brunelle et Whitlock 2003). Ces données soulignent une variabilité dans l'enregistrement de l'impact de l'Optimum climatique médiéval sur le patron des feux dans la forêt boréale du nord-est de l'Amérique du Nord.

La fréquence des feux reconstituée pour la période contemporaine (300 dernières années) diffère significativement des données issues des reconstructions dendroclimatiques de LeGoff et al. (2007) sur des sites à proximité de notre zone d'étude. Les résultats présentés par ces auteurs ont été obtenus sur des sites beaucoup plus secs et plus propices au

déclenchement et à la propagation des feux, dans des massifs forestiers dominés par le pin gris.

Le patron global des feux présenté ici diffère de ce qui a été rapporté par Carcaillet et al. (2001a). En effet, ces auteurs ont trouvé des FRI plus faibles durant les derniers 2000 ans comparativement à la période 7000-3000 cal. BP. Cette étude a été menée sur des lacs situés dans la forêt boréale mixte (site Francis) et à la transition entre la forêt boréale mixte et la forêt boréale résineuse (site Pas de Fond). La différence entre les deux études réside dans le fait que l'installation d'un climat plus frais et plus humide durant le Néoglaciare (les derniers 3000 ans) a eu pour effet d'écourter la fin de la saison des feux (de 15 jours au maximum) (Hély et al. 2010). Or, les feux se produisent en fin de saison dans la forêt boréale résineuse et en début de saison dans la forêt boréale mixte. De surcroît le climat frais et sec du Néoglaciare a causé une augmentation de la proportion d'espèces résineuses (*Picea mariana*, *Abies balsamea* et *Pinus banksiana*) dans la forêt mixte, y favorisant l'éclosion et la propagation des feux.

## 2.6 Conclusion

Les résultats présentés ici montrent que le climat régional n'est pas le seul facteur qui influence le régime des feux dans le secteur étudié, à la limite nordique de la forêt boréale commerciale dans l'Ouest du Québec. Les facteurs locaux influencent la probabilité de déclenchement des feux au niveau du site. L'occurrence des feux a connu des augmentations importantes durant les périodes chaudes et sèches de l'Holocène, notamment au cours de l'Optimum climatique holocène. Actuellement la fréquence moyenne des feux est encore à l'intérieur des limites de variabilité naturelle, probablement parce que les précipitations sont encore suffisamment élevées pour contrecarrer l'effet du réchauffement. Cependant, il pourrait ne s'agir que d'une période de transition puisque des scénarios prévoient pour le milieu du XXI<sup>e</sup> siècle des températures proches de celles enregistrées durant l'Optimum climatique holocène (Flannigan et al. 2001; Plummer et al. 2006). Si cette augmentation de température n'est pas accompagnée d'une augmentation marquée des précipitations, le scénario holocène se répétera et l'occurrence des feux augmentera à la limite nordique de la forêt boréale commerciale au Québec, limitant la marge de manœuvre pour la récolte forestière.

## 2.7 Références bibliographiques

Ali, A.A., Carcaillet, C., et Bergeron, Y. 2009a. Long-term fire frequency variability in the eastern Canadian boreal forest: the influences of climate vs. local factors. *Global Change Biology* **15**: 1230-1241.

Ali, A.A., Higuera, P.E., Bergeron, Y., et Carcaillet, C. 2009b. Comparing fire-history interpretations based on area, number and estimated volume of macroscopic charcoal in lake sediments. *Quaternary Research* **72**: 462-468.

Allard, M., et Séguin, M.K. 1987. Le pergélisol au Québec nordique: bilan et perspectives. *Géographie physique et Quaternaire* **41**: 141-152.

Barber, D.C., Dyke, A., Hillaire-Marcel, C., Jennings, A.E., Andrews, J.T., Kerwin, M.W., Bilodeau, G., McNeely, R., Southon, J., Morehead, M.D., et Gagnon, J.M. 1999. Forcing of the cold event of 8200 years ago by catastrophic drainage of Laurentide lakes. *Nature* **400**: 344-348.

Bartlein, P.J., Anderson, K.H., Anderson, P.M., Edwards, M.E., Mock, C.J., Thompson, R.S., Webb, R.S., Webb, T., et Whitlock, C. 1998. Paleoclimate simulations for North America over the past 21,000 years: features of the simulated climate and comparisons with paleoenvironmental data. *Quaternary Science Reviews* **17**: 549-585.

Bergeron, Y., Cyr, D., Girardin, M.P., Carcaillet, C. 2010. Will climate change drive 21st century burn rates in Canadian boreal forest outside of its natural variability : collating global climate model experiments with sedimentary charcoal data. *International Journal of Wildland Fire* **19**: 1127-1139.

Brunelle, A., et Whitlock, C. 2003. Postglacial fire, vegetation, and climate history in the Clearwater Range, Northern Idaho, USA. *Quaternary Research* **60**: 307-318.

Carcaillet, C., et Richard, P.J.H. 2000. Holocene changes in seasonal precipitation highlighted by fire incidence in eastern Canada. *Climate dynamics* **16**: 549-559.

Carcaillet, C., Bergeron, Y., Richard, P.J.H., Fréchette, B., Gauthier, S., et Prairie, Y.T. 2001a. 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* **89**: 930-946.

Carcaillet, C., Bouvier, M., Fréchette, B., Larouche, A.C., et Richard, P.J.H. 2001b. Comparison of pollen-slide and sieving methods in lacustrine charcoal analyses for local and regional fire history. *The Holocene* **11**: 467-476.

Clark, J.S. 1989. Ecological disturbance as a renewal process: theory and application to fire history. *Oikos* **56**: 17-30.

Dale, V.H., Joyce, L.A., McNulty, S., Neilson, R.P., Ayres, M.P., Flannigan, M.D., Hanson, P.J., Irland, L.C., Lugo, A.E., Peterson, C.J., Simberloff, D., Swanson, F.J., Stocks, B.J., et Wotton, M. 2001. Climate change and forest disturbances. *BioScience* **51**, 723-734

Doss, H. 1989. On estimating the dependence between two point processes. *Annals of Statistics* **17**: 749-763.

Environment Canada. 2011. Normales climatiques au Canada 1971-2000. National Climate Archive. [http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate\\_normals/](http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/).

Filion, L. 1984. A relationship between dunes, fire and climate recorded in the Holocene deposits of Quebec. *Nature* **309**: 543-546.

Flannigan, M., Campbell, I., Wotton, M., Carcaillet, C., Richard, P.J.H., et Bergeron, Y. 2001. Future fire in Canada's boreal forest: paleoecology results and general circulation model - regional climate model simulations. *Canadian Journal of Forest Research* **31**: 854-864.

Flannigan, M.D., Amiro, B.D., Logan, K.A., Stocks, B.J., et Wotton, B.M. 2005. Forest fires and climate change in the 21st century. *Migration and Adaptation Strategies for Global Change* **11**: 874-859.

Gajewski, K. 1988. Late Holocene climate changes in eastern North America estimated from pollen data. *Quaternary Research* **29**: 255-262.

Garralla, S., et Gajewski, K. 1992. Holocene vegetation history of the boreal forest near Chibougamau, central Quebec. *Canadian Journal of Botany* **70**: 1364-1368.

Gavin, D.G., Sheng, H.F., Lertzman, K., et Corbett, P. 2006. Weak climatic control of stand-scale fire history during the late Holocene. *Ecology* **87**: 1722-1732.

Girard, F., Payette, S., et Gagnon, R. 2009. Origin of the lichen-spruce woodland in the closed-crown forest zone of eastern Canada. *Global Ecology and Biogeography* **18**: 291-303.

Girardin, M.P., Tardif, J., Flannigan, M.D., et Bergeron, Y. 2004. Multicentury reconstruction of Canadian drought code from eastern Canada and its relationship with paleoclimatic indices of atmospheric circulation. *Climate Dynamics* **23**: 99-115.

Hamann, A., et Wang, T. 2006. Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia. *Ecology* **87**: 2773-2786.

Harrison, S.P. 1989. Lake levels and climatic change in eastern North America. *Climate Dynamics* **3**: 157-167

Hély, C., Bergeron, Y., et Flannigan, M.D. 2000. Effect of stand composition on fire hazard in mixed-wood Canadian boreal forest. *Journal of Vegetation Science* **11**: 813-824.

Hély, C., Girardin, M.P., Ali, A.A., Carcaillet, C., Brewer, S., et Bergeron, Y. 2010. Eastern boreal North American wildfire risk of the past 7000 years: A model-data comparison. *Geophysical Research Letters* **37**: L14709.

Higuera, P.E., Peters, M.E., Brubaker, L.B., et Gavin, D.G. 2007. Understanding the origin and analysis of sediment-charcoal records with a simulation model. *Quaternary Science Reviews* **26**: 1790-1809.

Higuera, P.E., Brubaker, L.B., Anderson, P.M., Brown, T.A., Kennedy, A.T., et Hu, F.S. 2008. Frequent fires in ancient shrub tundra: Implications of paleorecords for Arctic environmental change. *PLoS ONE* **3**(3): e0001744. doi:10.1371/journal.pone.0001744

Higuera, P.E., Brubaker, L.B., Anderson, P.M., Hu, F.S., et Brown, T.A. 2009. Vegetation mediated the impacts of postglacial climate change on fire regimes in the south-central Brooks Range, Alaska. *Ecological Monographs* **79**: 201-219.

Hunt, B.G. 2006. The medieval warm period, the little ice age and simulated climatic variability. *Climate Dynamics* **27**: 677-694.

IPCC. 2007. *Climate change 2007: The Physical Science Basis*, Contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Kelly, R.F., Higuera, P.E., Barrett, C.M., Hu, F.S. 2011. A signal-to-noise index to quantify the potential for peak detection in sediment-charcoal records. *Quaternary Research* **75**: 11-17.

Lavoie M., et Richard, P.J.H. 2000. Postglacial water-level changes of a small lake in southern Québec, Canada. *The Holocene* **10**: 621-634.

Le Goff, H., Flannigan, M.D., Bergeron, Y., et Girardin, M.P. 2007. Historical fire regime shifts related to climate teleconnections in the Waswanipi area, central Quebec, Canada. *International Journal of Wildland Fire* **16**: 607-618.

Mansuy, N., Gauthier, S., Robitaille, A., Bergeron, Y. 2010. The effects of surficial deposit-drainage combinations on spatial variations of fire cycles in the boreal forest of eastern Canada. *International Journal of Wildland Fire* **19**: 1083-1098.

Muller, S.D., Richard, P.J.H., Guiot, J., de Beaulieu, J.-L., et Fortin, D. 2003. Postglacial climate in the St. Lawrence lowlands, southern Québec: pollen and lake-level evidence. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **193**: 51-72.

Payette, S. 1992. Fires as a controlling process in the North American boreal forest. In Shugart, H.H., Leemans, R., et Bonan, G.B. (Dir.), *A systems analysis of the global boreal forest*. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 144-169.

Plummer, D.A., Caya, D., Frigon, A., Côté, H., Giguère, M., Paquin, D., Biner, S., Harvey, R., et De Elia, R. 2006. Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. *Journal of Climate* **19**: 3112-3132.

Richard, P.J.H. 1995. Le couvert végétal du Québec-Labrador il y a 6000 ans BP : essai. *Géographie physique et Quaternaire* **49**: 117-140.

Ripley, B.D. 1977. Modeling spatial patterns. *Journal of the Royal Statistical Society* **B39**: 172-212.

Robitaille, A., Allard, M., 1996. Guide pratique d'identification des dépôts de surface au Québec. (Notions élémentaires de géomorphologie) Les Publications du Québec, Québec 109p

Saucier, J.-P., Bergeron, J.-F., Grondin, P., Robitaille, A. 1998. Les régions écologiques du Québec méridional (troisième version). Ministère des Ressources naturelles du Québec: Québec, Canada. 14 p.

Soja, A.J., Tchepakova, N.M., French, N.H.F., Flannigan, M.D., Shugart, H.H., Stocks, B.J., Sukhinin, A.I., Parfenova, E.I., Chapin III, F.S., et Stackhouse, J.P.W. 2007. Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations. *Global and Planetary Change* **56**: 274-296.

Stuiver, M., Reimer, P.J., 1993. Extended 14C database and revised CALIB calibration program. *Radiocarbon* **35**: 215-230.

Viau, A.E., Gajewski, K., Sawada, M.C., et Fines, P. 2006. Millennial-scale temperature variations in North America during the Holocene. *Journal of Geophysical Research* **111**: D09102.

Weber, M.G., et Flannigan, M.D. 1997. Canadian boreal forest ecosystem structure and function in a changing climate: impact on fire regimes. *Environmental Reviews* **5**: 145-166.

Wein, R.W., Burzynski, M.P., Sreenivasa, B.A., et Tolonen, K. 1987. Bog profile evidence of fire and vegetation dynamics since 3000 years BP in the Acadian forest. *Canadian Journal of Botany* **65**: 1180-1186.

Whitlock, C., et Anderson, R.S. 2003. Fire history reconstructions based on sediment records from lakes and wetlands In Veblen, T.T., Baker, W.L., Montenegro, G., et Swetnam, T.W. (Dir.), *Fire and climatic change in temperate ecosystems of the western Americas*. Springer, New York. pp. 3-31.

## CHAPITRE III

### CONCLUSION GÉNÉRALE

La présente étude avait pour objectif de reconstituer l'historique des feux à la limite nordique de la forêt commerciale québécoise et d'évaluer l'impact des grands changements climatiques holocènes sur ce régime de perturbation. Ce travail s'inscrit dans une démarche visant à améliorer nos connaissances de la variabilité naturelles des feux de forêt en réponse aux changements climatiques afin d'établir des conditions de référence nécessaires à l'instauration d'un aménagement forestier écosystémique et durable.

Les résultats montrent que le climat n'est pas le seul principal facteur qui influence le régime des feux à l'échelle séculaire ou millénaire. En effet, des facteurs locaux (non climatiques) peuvent également avoir un effet sur ce régime de perturbation en influençant la probabilité de déclenchement. La reconstitution de l'historique holocène des feux à la limite nordique de la forêt boréale commerciale montre que les feux ont été moins fréquents durant les trois derniers millénaires qu'auparavant (entre 7000 et 3500 cal. BP). Le nombre de feux par millénaire a connu des augmentations importantes durant les périodes chaudes comme l'Optimum climatique holocène et l'Optimum climatique médiéval.

Le régime actuel des feux de la région à l'étude est encore à l'intérieur de la variabilité naturelle holocène. À court terme, un remplacement du régime des feux par un aménagement forestier écosystémique qui permet de reproduire les mêmes patrons spatiotemporels est donc encore possible (Bergeron et al. 2006; 2010). Cependant, la coupe totale et la coupe avec faible rétention, qui sont encore la norme dans la région d'étude ne sont pas recommandées, en raison de leur impact sur la composition, la dynamique, ainsi que sur la résilience de l'écosystème (Bergeron et al. 2002; Bergeron et Le Goff 2005; Drever et al. 2006). En fait, les pratiques avec lesquelles la forêt est aménagée causent un rajeunissement du couvert forestier par rapport aux forêts naturelles, où les cycles de feux sont plus longs que la révolution forestière (Bergeron et al. 2006). Ce rajeunissement des forêts engendre une

raréfaction de certains attributs clés au maintien de la résistance et de la résilience des écosystèmes (Gauthier et al. 2008)

À moyen et à long terme, les résultats de notre étude ne permettent pas de prédire des valeurs exactes. Or, on peut bien prédire une augmentation de l'occurrence des feux. Ajoutés aux coupes, ces feux pourraient entraîner l'écosystème à l'extérieur de ses limites de variabilité naturelle (Cyr et al. 2009). Des stratégies d'aménagement qui intègrent le risque des feux dans la planification forestière s'avéreront donc indispensables (Le Goff et al. 2005). Parmi les pratiques adaptatives à recommander, notons la réduction de l'ampleur des opérations forestières, la suppression des feux, l'amélioration de la régénération, le brûlage dirigé et la favorisation des coupes de récupération systématiques (Le Goff et al. 2005, 2008; Bergeron et al. 2006, 2010).

### 3.1 Perspectives de recherche

Certaines questions restent encore sans réponse au terme de ce projet, ouvrant quelques perspectives de recherche. Il serait intéressant d'identifier les facteurs locaux (non climatiques) qui influencent le déclenchement des incendies forestiers, ce qui permettrait de mieux caractériser leur variabilité spatiale. Il serait également intéressant de simuler les changements du régime des feux dans le futur sous différents scénarios de réchauffement climatique et selon différentes stratégies d'aménagement forestier. En parallèle, une connaissance des dynamiques passées de la végétation à différentes échelles spatiales (locale versus régionale) en réponse aux changements de fréquence des feux, est indispensable pour véritablement caractériser le seuil de résilience de la forêt boréale commerciale face aux perturbations naturelles et anthropiques.

### 3.2 Références bibliographiques

Bergeron, Y., et Le Goff, H. 2005. Doit-on remettre en question notre façon d'aménager la forêt boréale canadienne? *Vertigo* **6**: 1-7.

Bergeron, Y., Leduc, A., Harvey, B.D., et Gauthier, S. 2002. Natural fire regime: A guide for sustainable management of the Canadian boreal forest. *Silva Fennica* **36**: 81-95.

Bergeron, Y., Cyr, D., Drever, C.R., Flannigan, M., Gauthier, S., Kneeshaw, D., Lauzon, È., Leduc, A., Le Goff, H., Lesieur, D., et Logan, K. 2006. Past, current, and future fire frequencies in Quebec's commercial forests: implications for the cumulative effects of harvesting and fire on age-class structure and natural disturbance-based management. *Canadian Journal of Forest Research* **36**: 2737-2744.

Bergeron, Y., Cyr, D., Girardin, M.P., Carcaillet, C. 2010. Will climate change drive 21st century burn rates in Canadian boreal forest outside of its natural variability : collating global climate model experiments with sedimentary charcoal data. *International Journal of Wildland Fire* **19**: 1127-1139.

Cyr, D., Gauthier, S., Bergeron, Y., et Carcaillet, C. 2009. Forest management is driving the eastern North American boreal forest outside its natural range of variability. *Frontiers in Ecology and the Environment* **7**: 519-524.

Drever, C.R., Peterson, G., Messier, C., Bergeron, Y., et Flannigan, M. 2006. Can forest management based on natural disturbances maintain ecological resilience? *Canadian Journal of Forest Research* **36**: 2285-2299.

Gauthier, S., Vaillancourt, M.A., Kneeshaw, D., Drapeau, P., De Grandpré, L., Claveau, Y., et Paré, D. 2008. Aménagement forestier écosystémique : Origine et fondement. In Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Leduc, A., De Grandpré, L., Kneeshaw, D., Morin, H., Drapeau, P., et Bergeron, Y. (Dir.), *Aménagement écosystémique en forêt boréale*. Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, Québec. pp. 15-40.

Le Goff, H., Leduc, A., Bergeron, Y., et Flannigan, M. 2005. The adaptive capacity of forest management to changing fire regimes in the boreal forest of Quebec. *Forestry Chronicle* **81** :582-592.

Le Goff, H., Flannigan, M.D., Bergeron, Y., Leduc, A., Gauthier, S., et Logan, K. 2008. Des solutions d'aménagement pour faire face aux changements climatiques : l'exemple des feux de forêts. In Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Leduc, A., De Grandpré, L., Kneeshaw, D., Morin, H., Drapeau, P., et Bergeron, Y. (Dir.), *L'aménagement écosystémique en forêt boréale*. Presse de l'Université du Québec, Sainte -Foy, Québec. pp.111-131.