

Coévolution de la végétation et des régimes de feux en réponse aux principaux épisodes climatiques rapides du dernier millénaire, au niveau de deux lacs situés dans la pessière à mousse de l'est du Québec

Manon Decrouy

Professeurs superviseurs: Carsten Meyer-Jacob, Jonathan Lesven

Responsable pédagogique: Florence Mazier

Master 2 GAED - Parcours Gestion et Evaluation des environnements

Montagnards

UE 111 Stage professionnel

Année 2024 - 2025

Attestation sur l'honneur

Je soussignée

Nom, prénom : Manon Decrouy

Master 2 GAED

Parcours : GEMO

Année universitaire : 2024-2025

Certifie sur l'honneur que le document joint à la présente déclaration :

- Est un travail original, c'est-à-dire que :
 - o toute idée ou formulation tirée d'un ouvrage, article ou mémoire, en version imprimée ou électronique, mentionne explicitement et précisément leur origine
 - o toute source (site internet, recueil de discours, etc.) est précisément citée
 - o les citations intégrales sont signalées entre guillemets ou sous la forme d'un paragraphe clairement identifié lorsqu'il s'agit de citations longues
- N'a pas été rédigé, même partiellement, par une intelligence artificielle
- N'a pas été structuré, même partiellement, par une intelligence artificielle
- Ne s'appuie pas sur une synthèse réalisée par une intelligence artificielle (synthèse bibliographique par exemple)
- Ne présente pas d'illustration, carte, image, etc. générée par une intelligence artificielle

Par ailleurs, je déclare avoir utilisé une intelligence artificielle pour : [cocher la ou les cases si nécessaire]

- ☒ Corriger l'orthographe et le style de mon mémoire
- ☒ Traduire des passages de publications en langue étrangère. *Dans ce cas, les passages utilisés dans le mémoire sont clairement identifiés et précisent quel logiciel d'IA a été mobilisé*

Fait à Rapide-Danseur, Québec, Canada

Le 22 Août 2025

Signature



*Conserver la mention appropriée

Remerciements

Tout d'abord, je remercie le Laboratoire International de Recherche sur les Forêts Froides de m'avoir donné l'opportunité de faire ce stage sur les forêts du Québec, ainsi que la station de la Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet de m'avoir accueillie au sein de ses locaux pour élaborer mes recherches. Merci à l'Université Jean-Jaurès de Toulouse de m'avoir permis d'effectuer ce stage.

Ensuite, je remercie Carsten Meyer-Jacob, professeur de recherche, Jonathan Lesven et Dorian Gaboriau, postdoctorants, pour le soutien, les échanges enrichissants et les savoirs qu'ils m'ont transmis tout au long de ce projet. Je remercie également mon enseignante référente Mme Florence Mazier, enseignante-chercheuse, pour ses conseils et son accompagnement dans la réalisation de ce stage. Merci aussi à Yvan pour avoir rendu le séjour à la station agréable et convivial.

Enfin, je remercie la gang zonzon composée d'Edgar, Juliane, Manon, Juliette, Émile, Théodore et Béatrice pour tous les moments que nous avons partagés ensemble durant ces 6 mois de stage, ainsi que ma famille pour ses encouragements dans l'accomplissement de cette expérience au Québec.

Table des matières

Remerciements.....	
Liste des sigles	
Résumé.....	1
Abstract	2
I. Introduction	3
II. Contexte de stage	8
III. Etat de l’art.....	13
1. Du Dryas à l’Holocène.....	13
2. Variabilité millénaire de l’Holocène.....	15
3. Variabilité séculaire au cours du Néoglaciale	24
IV. Matériel et méthodes.....	26
1. Aire d’étude et caractéristiques des lacs	26
A. Lac 6	26
B. Lac Rosette	29
2. Récolte des carottes sédimentaires.....	30
3. Chronologies	31
4. Analyse pollinique	31
A. Extraction des grains de pollen	31
B. Identification et comptage des grains de pollen	32
5. Reconstitution de la dynamique de végétation	37
6. Reconstitutions quantitatives des températures estivales	38
7. Reconstitution des variables de feu.....	38
8. Analyses numériques	39
V. Résultats	40
1. Histoire des feux sous l’influence de la variabilité climatique rapide	40
2. Trajectoire de la végétation face aux fluctuations climatiques	45
A. Lac Rosette	45
B. Lac 6	48
3. Relations climat-feu-végétation entre les deux sites d’étude	52
A. Lac Rosette	52
B. Lac 6	54

4. Mise en parallèle entre les deux lacs	56
VI. Discussion.....	57
1. Influence des facteurs abiotiques (température, gradient d'humidité, feux) sur la dynamique de végétation.....	57
A. Anomalie Climatique Médiévale.....	57
B. Petit Âge Glaciaire	59
C. Réchauffement actuel	60
2. Relation spatiale entre les deux sites d'études	61
Conclusion	62
Bibliographie.....	
Annexes.....	
Listes des annexes.....	
Table des matières détaillées	

Liste des sigles

AA: Avant Aujourd'hui

ACM: Anomalie Climatique Médiévale

ACP: Analyse en Composantes Principales

AMS: Spectrométrie de Masse Accélérée

BB: Biomasse Brûlée

BP: Before Present

CEF: Centre d'Étude de la Forêt

CNRS: Centre National de la Recherche Scientifique

CONISS: Regroupement par Somme de Carrés Incrémentale Contrainte

FF: Fréquence de Feu

FERLD: Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet

FRQ: Fond de Recherche du Québec

FS: Fire Size

HTM: Holocene Thermal Maximum

IRP: Projet de Recherche International

LOESS : Locally weighted scatterplot smothing

Nexfor: Produits forestiers Tembec et les Industries Norbord

OBV: Organisme de bassins versants Duplessis

PAG: Petit Âge Glaciaire

SNI: Indice Signal-Bruit

TBE: Tordeuse des Bourgeons de l'Épinette

UFC: Université de Franche-Comté

UM: Université de Montpellier

UQAM: Université du Québec à Montréal

UQAT: Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

URDAT: Unité de recherche du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Résumé

La forêt boréale de l'est du Québec, située dans l'Hémisphère Nord, est caractérisée par un climat humide, une faible fréquence d'incendies, mais ceux-ci sont généralement de forte intensité. Cette région étant encore peu étudiée, notre objectif est de reconstituer la dynamique de la végétation, associée aux variations du climat et du régime des incendies, au cours des événements climatiques rapides du dernier millénaire. Ces analyses sont effectuées à partir de deux lacs situés à l'ouest de la Côte-Nord, dans le domaine bioclimatique de la pessière à mousse, le lac Rosette et le lac 6. Avant les variations générées par ces événements climatiques rapides, le paysage était dominé majoritairement par l'épinette noire et du bouleau. L'analyse conjointe des régimes de feux et de la végétation met en évidence plusieurs tendances générales. Durant l'Anomalie Climatique Médiévale (1 050 – 700 ans AA), on observe une hausse des températures, accompagnée d'une faible activité incendiaire et d'une colonisation accrue par les feuillus. Au Petit Âge Glaciaire (750 – 150 ans AA), les températures diminuent fortement et les incendies deviennent plus fréquents et plus intenses, favorisant une coniférisation du paysage. Enfin, au cours du réchauffement actuel (100 – 74 ans AA), l'activité incendiaire atteint un minimum, tandis que les taxons feuillus et les herbacées connaissent une expansion progressive. Toutefois, une divergence est observée entre les deux lacs en raison de la proximité du golfe du Saint-Laurent, particulièrement pour le lac 6, qui bénéficie de conditions plus humides que le lac Rosette. Cette différence hydrique influence directement le régime des incendies. Les conditions plus sèches du lac Rosette favorisent des feux de plus grande taille et une biomasse brûlée plus importante, tandis que l'humidité accrue du lac 6 entraîne des incendies de moindre taille, mais plus fréquents. Ces contrastes se traduisent par des différences dans la dynamique de végétation. Au lac Rosette, la végétation reste dominée par des taxons boréaux tolérants au feu, principalement l'épinette noire. Au lac 6, l'épinette noire est présente en proportion moindre, associée au bouleau, plus thermophile, et au sapin baumier, une espèce peu tolérante aux feux de grande superficie.

Mots clés: incendie, végétation, Anomalie Climatique Médiévale, Petit Âge Glaciaire, réchauffement climatique

Abstract

The boreal forest of eastern Quebec, located in the Northern Hemisphere, is characterized by a humid climate, a low frequency of fires, but with generally high intensity when they do occur. Since this region remains relatively understudied, our objective is to reconstruct vegetation dynamics in relation to variations in climate and fire regimes during the rapid climate events of the last millennium. These analyses are based on two lakes located west of the Côte-Nord region, within the black spruce–moss bioclimatic domain: Lake Rosette and Lake 6. Prior to the changes induced by these rapid climate events, the landscape was largely dominated by black spruce and birch. The joint analysis of fire regimes and vegetation highlights several general trends. During the Medieval Climate Anomaly (1,050–700 cal. BP), temperatures increased, accompanied by low fire activity and a greater colonization by deciduous species. During the Little Ice Age (750–150 cal. BP), temperatures dropped significantly, while fires became more frequent and intense, promoting the coniferization of the landscape. Finally, during the pre-industrial warming (100–74 cal. BP), fire activity reached a minimum, while deciduous taxa and herbaceous plants experienced a progressive expansion. However, a divergence is observed between the two lakes due to the proximity of the Gulf of St. Lawrence, particularly for Lake 6, which benefits from wetter conditions than Lake Rosette. This difference in moisture directly influences the fire regime. The drier conditions at Lake Rosette favor larger fires and greater burned biomass, whereas the increased humidity at Lake 6 leads to smaller but more frequent fires. These contrasts result in differences in vegetation dynamics. At Lake Rosette, vegetation remains dominated by fire-tolerant boreal taxa, primarily black spruce. At Lake 6, black spruce occurs in lower proportions and is associated with birch, a more thermophilous species, as well as balsam fir, which is poorly adapted to large-scale fires.

Keywords: fire, vegetation, Medieval Climate Anomaly, Little Ice Age, climate warming

I. Introduction

La région boréale représente la zone de végétation circumpolaire des hautes latitudes de l'Hémisphère Nord, couvrant 270 millions ha, principalement recouverte de forêts et d'autres terres boisées composées d'une faible diversité d'espèces tolérantes au froid (Brandt, 2009; Brandt et al., 2013; Rogers et al., 2015). Le biome boréal représente environ 30% de la superficie forestière mondiale (Brandt et al., 2013) et s'étend approximativement entre 47 et 70 degrés de latitude nord (Gauthier et al., 2015). Les écosystèmes forestiers boréaux ont évolué sous les contraintes imposées par une courte saison de croissance et des hivers longs et rigoureux, durant lesquels la couverture neigeuse peut persister plusieurs mois (Kneeshaw et al., 2011). Ces forêts participent à la régulation du climat par l'échange d'énergie et d'eau (Gauthier et al., 2015), ainsi que par le stockage de 32% du carbone terrestre global (500 Tg de carbone par an), principalement accumulé dans les dépôts de tourbe, les sols et le pergélisol (Pan et al., 2011). Ce grand réservoir de carbone biogénique est comparable, voire supérieur aux forêts tropicales (Pan et al., 2011). Les forêts boréales nord-américaines en particulier jouent un rôle précieux dans le maintien des réservoirs d'eau douce, le soutien des services écosystémiques fondamentaux (Gauthier et al., 2015), le maintien des sols contre l'érosion (Costanza et al., 1998) et renferment une grande diversité biologique et génétique (Brandt et al., 2013). Outre leur importance écologique reconnue, les forêts boréales revêtent une valeur traditionnelle et spirituelle fondamentale pour les peuples autochtones (Berkes and Davidson-Hunt, 2006; Oberndorfer, 2020; Brandt, 2009). Historiquement, et encore aujourd'hui, de nombreuses communautés autochtones vivent à proximité ou à l'intérieur de ces forêts, tirant parti des ressources forestières pour des activités telles que la chasse, la pêche, la cueillette et diverses pratiques culturelles (Teitelbaum et al., 2023). Ces forêts ont aussi une valeur économique, sociale et culturelle majeure pour le reste des populations humaines (Hassan et al., 2005; Johnson and Miyanishi, 2012). Sur le plan économique, les forêts boréales assurent plus de 33% de l'approvisionnement mondial en bois (construction, chauffage) et contribuent à environ 25% de la production mondiale de papier (Mery et al., 2010).

En Amérique du Nord, la zone boréale s'étend de la province canadienne de Terre-Neuve-et-Labrador, jusqu'à l'état américain de l'Alaska (Brandt, 2009). Depuis la déglaciation (~15 000 - 5 700 ans AA) (Dalton et al., 2020), le climat, les feux, les insectes, les maladies et leurs interactions ont constitué les forces naturelles les plus influentes sur la composition, la structure et la dynamique de la végétation boréale (Brandt et al., 2013; Hanes et al., 2018). En

Amérique du Nord particulièrement, les incendies représentent une force évolutive majeure et sont à l'origine d'une mosaïque de végétation (Girardin et al., 2013). Dans l'est du Canada, le gradient de l'activité incendiaire augmente d'est en ouest (Portier et al., 2016) (Figure 1), régi par les conditions climatiques et météorologiques. Ces derniers représentent les principaux moteurs de leur dynamique (Jain et al., 2017; Hanes et al., 2018), suivis du type de combustible, des agents de combustion et des humains (Hanes et al., 2018). Au Canada, 35% des feux de forêt sont causés par la foudre, mais représentent plus de 85% de la superficie totale brûlée (Weber and Stocks, 1998). La zone boréale est-canadienne est principalement dominée par le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), le mélèze laricin (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch), l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss), l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.), le pin blanc (*Pinus strobus* L.) et le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.), avec des proportions variables de peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.), de bouleau (*Betula* spp.) et d'aulne (*Alnus* spp.) (Kneeshaw et al., 2011). En Amérique du Nord, les feux se développent principalement dans les peuplements de pin gris et d'épinette noire matures (Viereck et al., 1990; Bergeron et al., 1998). Ces espèces produisent des cônes sérotineux, c'est-à-dire dont les cônes s'ouvrent quand ils sont soumis à la chaleur d'un incendie, permettant ainsi l'élimination des espèces compétitives et la libération des graines (Johnstone et al., 2009; Ayotte, 2014). De plus, le feu est essentiel au sein des écosystèmes boréaux pour assurer la régulation des insectes et des maladies en influençant la composition des espèces, la structure d'âge et la biodiversité (Weber and Stocks, 1998; Stocks et al., 2002).

Le biome boréal se réchauffe environ deux fois plus vite que la moyenne mondiale (Gauthier et al., 2015). Selon les scénarios prévisionnels, les écosystèmes boréaux nord-américains devraient subir une augmentation des températures pouvant aller jusqu'à 10°C (Gauthier et al., 2015), accompagnée d'une augmentation des précipitations beaucoup plus modestes (World Bank, 2014). Ces modifications climatiques ont déjà, et auront des répercussions majeures sur les écosystèmes boréaux nord-est américains, parmi lesquels l'est du Québec devrait largement être impacté (Girard et al., 2008). L'accroissement de la sécheresse devrait modifier la dynamique des régimes de feu, se traduisant par un allongement de la saison des incendies, de leur fréquence et de leur sévérité (REF) (Flannigan and Wotton, 2001; Flannigan et al., 2005; Wotton et al., 2010), menaçant profondément le processus de régénération naturelle des écosystèmes forestiers (Boulanger et al., 2025). L'augmentation des températures devrait également générer une fenêtre favorable à l'émergence plus précoce des chenilles de la Tordeuse des Bourgeons de l'Épinette (TBE), un insecte défoliateur des

conifères boréaux nord-américains. Une augmentation de 4°C entraînerait une survie accrue des insectes et des épidémies plus importantes, avec une augmentation significative de la surface de défoliation (Sauri Ramirez, 2020).

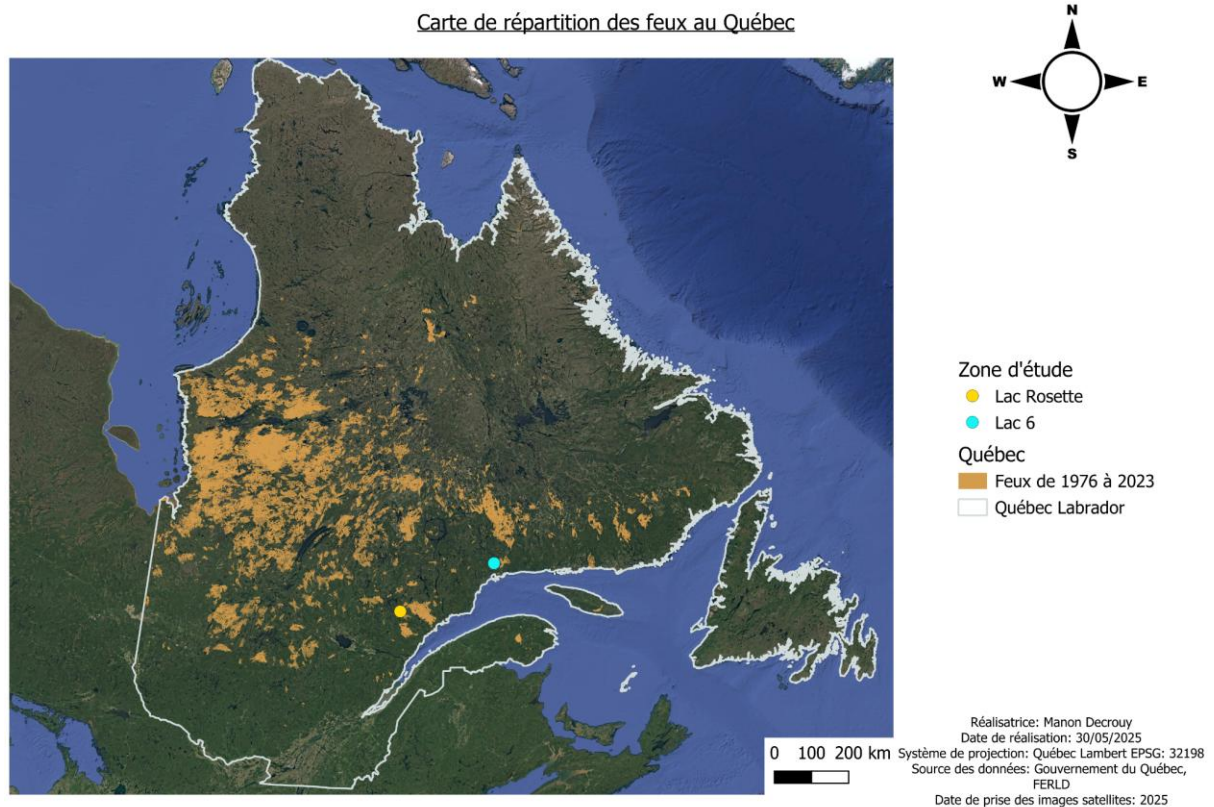


Figure 1 : Carte de l'activité incendiaire à l'échelle du gradient longitudinal au Québec.

La modification de ces perturbations naturelles, combinée à l'augmentation des températures, pourrait largement modifier les capacités de résilience des forêts boréales nord-américaines et générer une vulnérabilité accrue des arbres hôtes à la TBE (Subedi, 2023), au stress hydrique (Peng et al., 2011; Chen et al., 2017), ainsi que des échecs de régénération en réponse à des incendies trop fréquents (Bossé and Bergeron, 2024).

Dans ce contexte de changement climatique, il est crucial de mieux comprendre la dynamique de ces écosystèmes, à des échelles de temps pluriséculaires à plurimillénaires. Une telle compréhension est indispensable pour permettre aux gestionnaires d'anticiper et de guider efficacement les stratégies d'atténuation des effets du changement climatique dans les écosystèmes boréaux, en définissant des objectifs adaptés et réalistes (Lindbladh et al., 2013). Actuellement, les forêts boréales figurent parmi les derniers grands biomes relativement

intacts, encore possible d'être préservés (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2025). Cependant, l'est du Canada présente une variabilité latitudinale et longitudinale importante, entraînant une réponse spatiale différentielle de la végétation et des incendies. La partie occidentale se caractérise par un climat continental relativement sec, alors que l'est du Québec-Labrador est influencé par la proximité du Golfe du Saint-Laurent et de l'océan Atlantique, lui conférant un climat sous influence maritime (Mackay et al., 2021). Les précipitations, majoritairement concentrées en été, sont régies par un gradient d'humidité qui varie d'est en ouest, avec des niveaux plus élevés proche des côtes, à l'inverse des zones continentales qui présentent des taux inférieurs (Brandt et al., 2013). Ces paramètres régissent la répartition de la végétation le long du gradient avec une dominance de l'épinette noire, du pin gris et du peuplier faux-tremble à l'ouest en raison d'une fréquence de feu élevée (Lesieur et al., 2002). À l'inverse, l'est du Québec est dominé par les épinettes noires et blanches, le sapin baumier et le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.), tandis que le pin gris ne peut y prospérer en raison d'intervalles de retour du feu trop longs (Asselin et al., 2003; Zhang and Chen, 2007).

À ce gradient longitudinal s'ajoute un gradient latitudinal important, caractérisé par un climat froid au nord du Québec (Bajolle et al., 2018; Fréchette et al., 2021) favorisant l'expansion de la toundra forestière, composée d'îlots épars d'épinettes noires, de mélèzes, bouleaux, saules (*Salix* spp.), aulnes, et de mousses, lichens et herbacées (Asselin and Payette, 2005; Gajewski et al., 2021). Les feux y sont généralement rares, mais certaines phases de réchauffement climatique entraînent une augmentation ponctuelle de leur fréquence (Gajewski, 2019; Gajewski et al., 2021). Ces grands feux favorisent l'expansion de feuillus, notamment le bouleau et l'aulne crispé (*Alnus alnobetula* (Ehrh.) K.Koch subsp. *crispa* (Aiton) Turrill) (Asselin and Payette, 2005; Gajewski et al., 2021). Plus au sud, le climat clément favorise le développement de la pessière à lichens, avec la présence de taxons pionniers, clairsemée d'épinette noire et d'épinette blanche (Payette and Delwaide, 2018; Baldwin et al., 2020). Le sud du Québec est marqué par des pessières fermées, dominées par l'épinette noire, le sapin baumier et le bouleau à papier (Scheffer et al., 2012; Baldwin et al., 2020).

C'est dans ce contexte de changements climatiques et de pressions croissantes sur les écosystèmes boréaux et montagnards qu'est né en 2017 le Laboratoire International de Recherche sur les Forêts Froides, hébergé au sein de la station de recherche de la Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet (FERLD). Le laboratoire mène des travaux

sur le fonctionnement des écosystèmes boréaux et montagnards de l'Hémisphère Nord. Les recherches ont notamment pour but de reconstituer les dynamiques écologiques, de proposer des stratégies de gestion et d'étudier les impacts du changement climatique sur les forêts boréales et de montagne (Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier, 2020). Dans cette même perspective, la réalisation d'un stage au sein du Laboratoire a eu pour objectif principal de reconstituer et comparer l'histoire écologique de deux lacs en Côte Nord, dont le lac 6, situé à proximité de Sept-Îles, et le lac Rosette, plus reclus dans les terres, au sein du territoire ancestral de la communauté autochtone de Pessamit.

À la suite de multiples travaux réalisés et aux recherches menées par le Laboratoire International de Recherche sur les Forêts Froides, l'histoire millénaire de la végétation et des feux au Québec commence à être connue. Cependant, l'est du Québec manque de données quantitatives sur le long terme (Bajolle, 2018). Alors que la majorité des études se sont concentrées sur la variabilité climatique à l'échelle millénaire (Helama et al., 2005; Bajolle, 2018; Delwaide et al., 2021; Ali et al., 2025), certaines études comme Asselin and Payette, (2005); Helama et al., (2017); Delwaide et al., (2021) ou encore Arseneault and Payette, (1997) ont mis en évidence l'existence d'événements climatiques rapides au cours du dernier millénaire en Amérique du Nord, susceptibles de constituer des analogues pertinents au réchauffement climatique actuel. Parmi ceux-ci, il est possible de nommer l'Anomalie Climatique Médiévale (ACM) (environ 1050 à 700 ans AA), caractérisée par un climat chaud, avec un réchauffement d'environ $+1,3^{\circ}\text{C}$ et de faibles précipitations (Bajolle, 2018; Delwaide et al., 2021; Collins et al., in press), le Petit Âge Glaciaire (PAG) (environ 500 à 100 ans AA) (Delwaide et al., 2021; Collins et al., in press), marqué par un climat froid et sec (Bergeron and Archambault, 1993) et un refroidissement d'environ 1 à $1,5^{\circ}\text{C}$ (Lesven et al., in press). Ces événements offrent une opportunité d'examiner les réponses passées de la végétation, afin de déterminer si elle a réagi à ces changements, et le cas échéant, de quelle manière. Ce mémoire se propose de répondre à la question "Comment la végétation et les régimes de feux ont-ils coévolué en réponse aux principaux épisodes climatiques rapides du dernier millénaire, à partir de deux lacs situés dans la pessière à mousse de l'est du Québec?". Afin de répondre à cette problématique, plusieurs hypothèses ont été formulées. Premièrement, il est envisagé que l'augmentation des températures durant l'Anomalie Climatique Médiévale (1 050 à 700 ans AA) aurait favorisé une dominance des feuillus tempérés, alors que l'augmentation de l'occurrence des feux lors du refroidissement du Petit Âge Glaciaire (500 à 100 ans AA), aurait favorisé une dominance accrue des conifères pyrophiles. Deuxièmement, il est suggéré que les

conditions plus humides du XXe siècle auraient réduit la fréquence des feux, entraînant une transition vers des paysages dominés progressivement par les feuillus. Troisièmement, il est supposé que le gradient d'humidité entre les deux lacs d'étude influence les conditions climatiques locales, générant une divergence dans la dynamique des feux et de la végétation. Dans des conditions plus humides, les feux sont moins fréquents, favorisant le développement de feuillus.

La structure de ce mémoire est organisée de manière à répondre de façon claire à la problématique posée. Tout d'abord, une présentation du cadre institutionnel et de ses missions est effectuée, suivie d'un état de l'art des recherches qui ont été menées antérieurement à l'échelle du Canada, puis à celle du Québec et plus spécifiquement au niveau des sites étudiés. Ensuite, les caractéristiques des deux lacs d'études, ainsi que les méthodes employées pour la collecte et l'analyse des données sont détaillées. Enfin, les résultats obtenus font l'objet d'une section dédiée, avant d'être discutés dans la dernière partie, afin d'en interpréter la portée et de mieux comprendre les dynamiques écologiques à l'œuvre dans la région d'étude.

I. Contexte de stage

La Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet (FERLD) se situe sur le territoire ancestral de la Première Nation Abitibiwinini, dans la région Abitibi-Témiscamingue, à l'ouest du Québec. Cette région se trouve au sein de la ceinture d'argile, une zone géomorphologiquement caractérisée par une topographie majoritairement plane (Bergeron et al., 2003). Le contexte géologique est principalement caractérisé par la présence de roches basaltiques, avec des occurrences locales de tufs felsiques et gabbros (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2025). La FERLD est située au cœur de la forêt boréale mixte, dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest du Québec (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2025).

La Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet

Depuis la fin des années 1970, des recherches en écologie forestière sont menées au Québec. À partir des années 1980, un programme de recherche en écologie forestière est élaboré, mené conjointement par le CEF (Centre d'étude de la forêt) de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) et l'URDAT (Unité de recherche du Québec en Abitibi-Témiscamingue)

de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT). Ce n'est qu'en 1996 que le gouvernement prend la décision de créer la Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet. Ces 8 045 hectares de forêts boréales sont gérés par ces mêmes instituts, ainsi que des représentants de deux compagnies forestières, le Groupe de Produits forestiers Tembec et les Industries Norbord (Nexfor) (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2025). La FERLD est un lieu de recherche, d'expérimentation et de démonstration, visant à développer des pratiques de gestion et d'aménagement forestiers respectueuses du fonctionnement des écosystèmes et adaptées aux attentes du milieu socio-économique (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2025).

L'ensemble de la forêt de la FERLD est divisé en deux catégories. L'une d'elles, couvrant 75% de la superficie, est considérée comme zone d'aménagement, destinée au développement, à l'application et à la démonstration de l'aménagement écosystémique en forêt boréale mixte. Les 25% restants sont classés en zone de conservation, comme référence naturelle à des fins d'évaluation et de surveillance écologique, à la suite d'une douzaine de feux survenus sur le territoire entre 1760 et 1944 (Figure 2). Ces forêts visent à favoriser l'intégration de la recherche fondamentale et appliquée, ainsi que le transfert des connaissances vers l'aménagement forestier, notamment par la mise en œuvre d'essais novateurs en sylviculture et en gestion. Par ailleurs, la forêt est utilisée comme outil de formation, en lien avec l'application concrète des principes de gestion forestière durable. Un cadre de gestion conjointe et intégrée (industrie-université) a été mis en place afin de faciliter la planification et le mise en œuvre de plans d'aménagement adaptés à une utilisation polyvalente et durable des ressources du territoire. Cette structure soutient la collaboration entre l'UQAM et l'UQAT, tout en favorisant l'implication d'autres organismes de recherche (Centre National de la Recherche Scientifique, Université de Montpellier, Université de Franche-Comté) dans les activités liées à la forêt (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2025)

Cartes de la localisation de la Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet

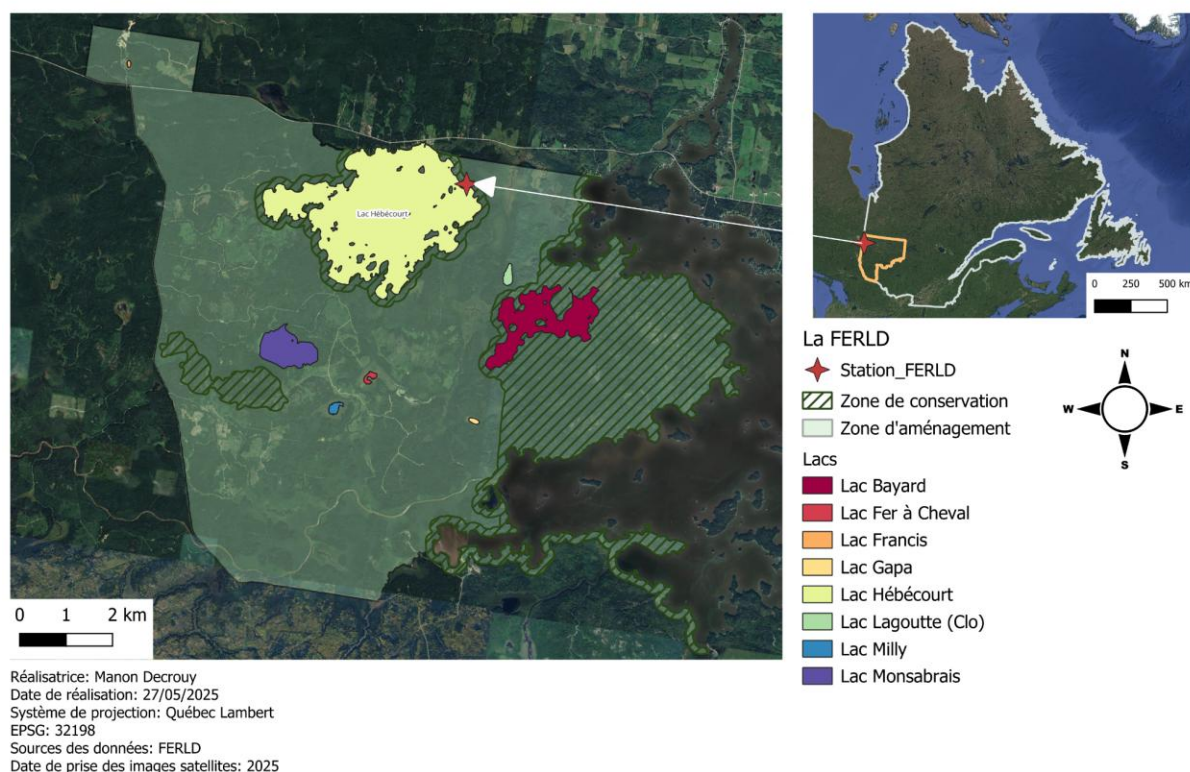


Figure 2: Carte de la localisation de la Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet.

En plus des forêts, le secteur de la FERLD comprend plusieurs lacs qui constituent des archives sédimentaires, essentielles à l'étude de la dynamique de la végétation et des incendies sur le territoire. En effet, la végétation retrouvée sur le site de la FERLD est dominée par les espèces se régénérant rapidement après feu comme le bouleau blanc, le peuplier faux-tremble, l'épinette noire et le pin gris. À l'inverse, les zones non touchées par des incendies depuis plusieurs centaines d'années sont dominées par le sapin baumier, le pin blanc, le thuya occidental (*Thuja occidentalis* L.) et l'épinette blanche (Bergeron et al., 1998; Larocque et al., 2000).

La station de la Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet

En réponse à une demande croissante en infrastructures de recherche et d'hébergement, la décision de construire une station de recherche a été prise à la fin des années 1990. Ainsi, c'est en 2005 que la station de la Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet a été officiellement établie sur la municipalité de Rapide-Danseur, dans la région Abitibi-

Témiscamingue, au Québec. Le site comprend quatre bâtiments principaux : un laboratoire multifonctionnel, qui abrite à la fois un laboratoire de chimie doté d'une hotte et un laboratoire sec équipé d'une étuve, un laboratoire de dendroécologie et un autre de paléoécologie, ainsi que deux pavillons, l'un dédié à l'hébergement et l'autre à des activités communautaires, où sont organisés des conférences et différents cours dispensés par l'université. La station de recherche est une infrastructure universitaire dont l'objectif est de soutenir le développement des connaissances en sciences forestières boréales. Elle vise à appuyer la réalisation de travaux de terrain et de laboratoire destinés aux chercheurs, étudiants et professionnels œuvrant dans le domaine des sciences forestières boréales. Elle offre un environnement de travail fonctionnel et accueillant, tout en assurant l'accès aux équipements de laboratoire nécessaires à la recherche scientifique. La station met également à disposition une infrastructure adaptée à la formation, notamment dans les disciplines liées aux sciences forestières, et sert de lieu d'accueil pour des rencontres régionales ainsi que pour des forums scientifiques d'envergure nationale et internationale.

Le Laboratoire International de Recherche sur les Forêts Froides

La Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet héberge le Laboratoire International de Recherche sur les Forêts Froides, un groupe de recherche collaboratif visant à améliorer la compréhension de la dynamique des écosystèmes froids (forêts boréales et forêts de montagnes) de l'Hémisphère Nord. Ces travaux visent à élaborer des stratégies de gestion adaptative face aux changements climatiques et sociétaux, dans le but de renforcer la résilience de ces écosystèmes. Ce réseau de recherche international regroupe plusieurs pays, dont la Chine, la Suède, la Russie, la Finlande, la Norvège, la France et le Canada. Il s'appuie sur des collaborations concrètes, notamment par la production de publications scientifiques, l'obtention de subventions, ainsi que la mise en place de projets en cotutelle entre la France et le Québec, les deux partenaires historiques. En effet, le Projet de Recherche International (IRP) est issu d'une collaboration entre le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), l'Université de Montpellier (UM), l'Université de Franche-Comté (UFC) et l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), qui forment les partenaires institutionnels, avec le Fond de Recherche du Québec (FRQ). S'ajoutent à ceux-ci des partenaires associés, dont le Service Canadien des Forêts et le Ministère de la Faune des Forêts et des Parcs (Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier, 2020)

Le Laboratoire est dirigé par un ou deux représentants de chaque pays partenaire (France, Canada, Suède et Russie), ce qui fait un total de 6 co-directeurs. Sa gouvernance s'articule autour d'un comité scientifique, composé des six co-directeurs, de chercheurs responsables des différents axes de recherche, ainsi que de deux experts scientifiques externes. Ensuite, les co-directeurs forment le comité de pilotage, chargé de la gestion administrative et financière du réseau, de son bon fonctionnement ainsi que de la coordination des objectifs proposés. Ce comité de pilotage assume la responsabilité des dépenses engagées et veille à la cohérence et à l'efficacité des actions menées. Chaque année, le comité de pilotage réunit le comité scientifique et les représentants des partenaires industriels et des organismes publics. Cette rencontre permet de faire le point sur l'avancement des travaux de recherche soutenus par le Laboratoire, et de proposer des réponses à des appels à projets dans les pays partenaires (Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier, 2020).

Le Projet de Recherche International se déploie sur cinq axes de recherche complémentaires, visant à approfondir la compréhension de la dynamique pluriséculaire des forêts froides et à évaluer leur trajectoire future dans un contexte de changements globaux. Le premier axe est consacré aux dynamiques des perturbations à l'aide d'approches paléoécologiques et dendrochronologiques. Le deuxième axe aborde la dynamique du climat et des risques de feux, grâce à une comparaison de données paléoclimatiques et modèles climatiques afin de caractériser et quantifier les principaux changements climatiques. Le troisième axe s'oriente sur les dynamiques forestières, à l'aide de reconstitution des paléovégétations et du climat, afin d'analyser les trajectoires écologiques des forêts boréales dans le temps. Le quatrième axe se consacre au bilan carbone et à l'étude biogéochimique des sols et tourbières, pour connaître leurs pouvoirs de séquestration du carbone. Enfin, le dernier axe se focalise sur les interactions environnement-sociétés en mettant l'accent sur les enjeux, les défis et la résilience des communautés autochtones face aux transformations environnementales (Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier, 2020).

Forêt boréale en Côte-Nord

Depuis sa création, le Laboratoire International de Recherche sur les Forêts Froides a réalisé diverses études et expéditions scientifiques à travers le Canada, bien qu'un nombre important d'études aient été réalisées dans l'ouest du Québec. Afin de combler un manque d'informations dans les régions plus orientales, plusieurs missions de terrain y ont été réalisées

au cours des deux dernières années demeurant peu, voire non documentées. C'est dans ce cadre que deux expéditions ont été réalisées en région Côte-Nord, entre les domaines bioclimatiques de la pessière à mousse et de la sapinière à bouleau blanc de l'est du Québec, au cours de l'hiver et de l'été 2024. L'objectif de ces missions était de récolter des sédiments de surface sur plusieurs lacs, au sein d'un même bassin versant afin d'évaluer l'impact des épidémies récentes de la TBE sur la qualité de l'eau, ainsi qu'une quantification et une analyse des particules carbonisées et des grains de pollen, dans le but de reconstituer l'histoire des incendies et la dynamique de la végétation des derniers siècles, voire des derniers millénaires. Les interventions menées dans les municipalités de Sept-Îles et du Lac aux Brochets ont fait l'objet d'une collaboration de membres de la communauté innue de Pessamit, de l'Organisme de bassins versants Duplessis (OBV) et de Ressources Naturelles Canada, pour les lacs de la région de Sept-Îles. Leur intérêt pour le projet réside dans la collecte de données sur la qualité de l'eau et l'évaluation des impacts potentiels des épidémies de TBE sur les écosystèmes lacustres. Concernant les lacs de Pessamit, la communauté innue de Pessamit a apporté son soutien et ses connaissances du milieu, dans le but de mieux connaître l'importance de certains lacs dans la compréhension du réchauffement climatique actuel, afin d'agrandir la zone protégée de Pimpuakan. En effet, l'est du Québec abrite une forte concentration de forêts anciennes, épargnées par les incendies depuis plusieurs siècles, ce qui soulève d'importants enjeux de conservation (Kneeshaw and Gauthier, 2003). Les données et connaissances issues du projet seront transmises aux communautés innues impliquées à Sept-Îles et Pessamit. L'objectif est de leur fournir un accès direct aux résultats afin de répondre à leurs besoins spécifiques, en particulier en ce qui concerne la qualité de l'eau, et plus généralement des écosystèmes lacustres.

II. Etat de l'art

1. Du Dryas à l'Holocène

Transition du climat du dernier maximum glaciaire à l'Holocène

La calotte glaciaire Laurentienne atteignait son expansion maximale il y a environ 22,000 ans (Dyke et al., 2002). Elle était centrée sur le bouclier canadien et s'étendait également à travers les plaines intérieures vers l'ouest et le sud du Canada (Dyke, 2004). Trois

secteurs majeurs de haute élévation de la glace formaient le noyau de ce complexe, le Dôme du Labrador, le Dôme de Keewatin, ainsi que le Dôme de Baffin, d'une élévation plus faible, situés respectivement à l'est, à l'ouest et au nord de la baie d'Hudson (Dyke et al., 1989). Progressivement, la glace s'est retirée sous l'effet de l'augmentation de l'insolation estivale après le dernier maximum glaciaire. En effet, les variations de trois paramètres orbitaux (excentricité, obliquité et précession des équinoxes) ont influencé la quantité et la répartition du rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre, générant des variations de l'insolation estivale dans les hémisphères nord et sud (Milankovitch, 1941). Ainsi, la radiation solaire a été jusqu'à 8% supérieure à l'actuelle entre 15 000 et 7000 ans avant aujourd'hui (AA), selon le modèle de Milankovitch (Richard and Labelle, 1989; Berger and Loutre, 1991).

Cette phase de réchauffement initial s'est étalée de 20 000 à 18 000 ans AA. Après une phase de stagnation jusqu'en 16 000 ans AA, la période de réchauffement a repris, stimulée par une hausse de l'insolation (Ullman et al., 2016), marquant le début de la phase de déglaciation de la calotte glaciaire Laurentienne à l'échelle du Canada (Dyke, 2004). Ces facteurs marquent ainsi la fin du Dryas et le début de l'Holocène aux alentours de 11 700 ans AA (Fréchette et al., 2021). Le retrait de la calotte glaciaire Laurentienne ne s'est cependant pas réalisé de manière uniforme. À l'échelle du Canada, la calotte s'est d'abord retirée dans les régions de la Colombie-Britannique et des Prairies canadiennes dès 15 000 ans AA et son retrait s'est accéléré vers 14 000 ans AA. Dans l'est, la déglaciation a été plus tardive du fait d'un climat plus maritime. Dans l'ouest du Québec, la calotte glaciaire a commencé à se retirer entre 9 600 et 9 000 ans AA (Dalton et al., 2020). Dû à l'influence plus maritime, l'est du Québec a subi une fonte tardive, débutant vers 10 300 ans AA et se terminant vers 7 500 ans AA dans la région Côte-Nord (Dalton et al., 2020), entraînant une forte variabilité climatique (Renssen et al., 2009). Ce contraste entre l'est et l'ouest du Québec favorise une diversification des domaines de végétation (Richard et al., 2020), ainsi qu'une réponse différentielle des feux (Erni et al., 2020). Pour ce faire, les connaissances sur la variabilité millénaire sont à coupler avec celles de la variabilité séculaire, afin de comprendre davantage la réponse de la végétation aux changements climatiques passés.

2. Variabilité millénaire de l'Holocène

Variabilité millénaire de l'Holocène dans l'est du Canada et influence sur la végétation

Déglaciation

Des reconstitutions basées sur des bioindicateurs fossiles (chironomes, grains de pollen) ont été réalisées pour cette période initiale (11 700 – 8 200 ans AA) (Bajolle, 2018; Fréchette et al., 2021; Feussom Tcheumeleu, 2023; Lesven et al., in press). Il a été mis en évidence que l'ampleur et la temporalité du réchauffement postglaciaire varient considérablement au Québec (Viau and Gajewski, 2009; Renssen et al., 2012; Bajolle, 2018; Feussom Tcheumeleu, 2023). Alors que l'insolation élevée aurait dû entraîner des températures chaudes, la présence de la calotte glaciaire laurentienne jusqu'à 7000 ans AA a entraîné un refroidissement important à l'échelle régionale. En effet, l'entrée dans le Maximum Thermique de l'Holocène (HTM) a été retardée par la présence résiduelle de la calotte glaciaire laurentidienne (Renssen et al., 2009; Renssen et al., 2012), encore présente jusqu'à environ 8000 ans AA dans la région Côte-Nord (Feussom Tcheumeleu et al., 2023) alors qu'elle avait disparu depuis 9000 ans AA dans l'ouest du Québec (Bajolle et al., 2018) (Figure 3). La présence de la calotte a en effet entraîné un refroidissement des masses d'air en altitude, induisant des vents catabatiques froids (Ullman et al., 2016; Renssen et al., 2012; Viau et al., 2006) et secs (Fréchette et al., 2021), refroidissant les températures localement. Ce processus, couplé à l'interaction entre l'albédo important de la calotte glaciaire et l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Viau et al., 2006; Renssen et al., 2009; Renssen et al., 2012), a contribué à des épisodes fréquents de sécheresse estivale durant la déglaciation. Malgré un nombre d'heures d'ensoleillement estival croissant (4%), entre 11 000 et 7000 ans AA dans l'est du Québec, ces paramètres ont contribué au refroidissement des températures (Fréchette et al., 2021). À l'ouest, les températures de l'air sont restées froides jusqu'à environ 9 000 ans AA (Bajolle, 2018). Malgré des précipitations relativement élevées (Richard and Labelle, 1989; Asnong and Richard, 2003), une forte incidence des incendies a été enregistrée de 11 700 à 8 300 ans AA dans l'est du Canada (Carcaillet and Richard, 2000).

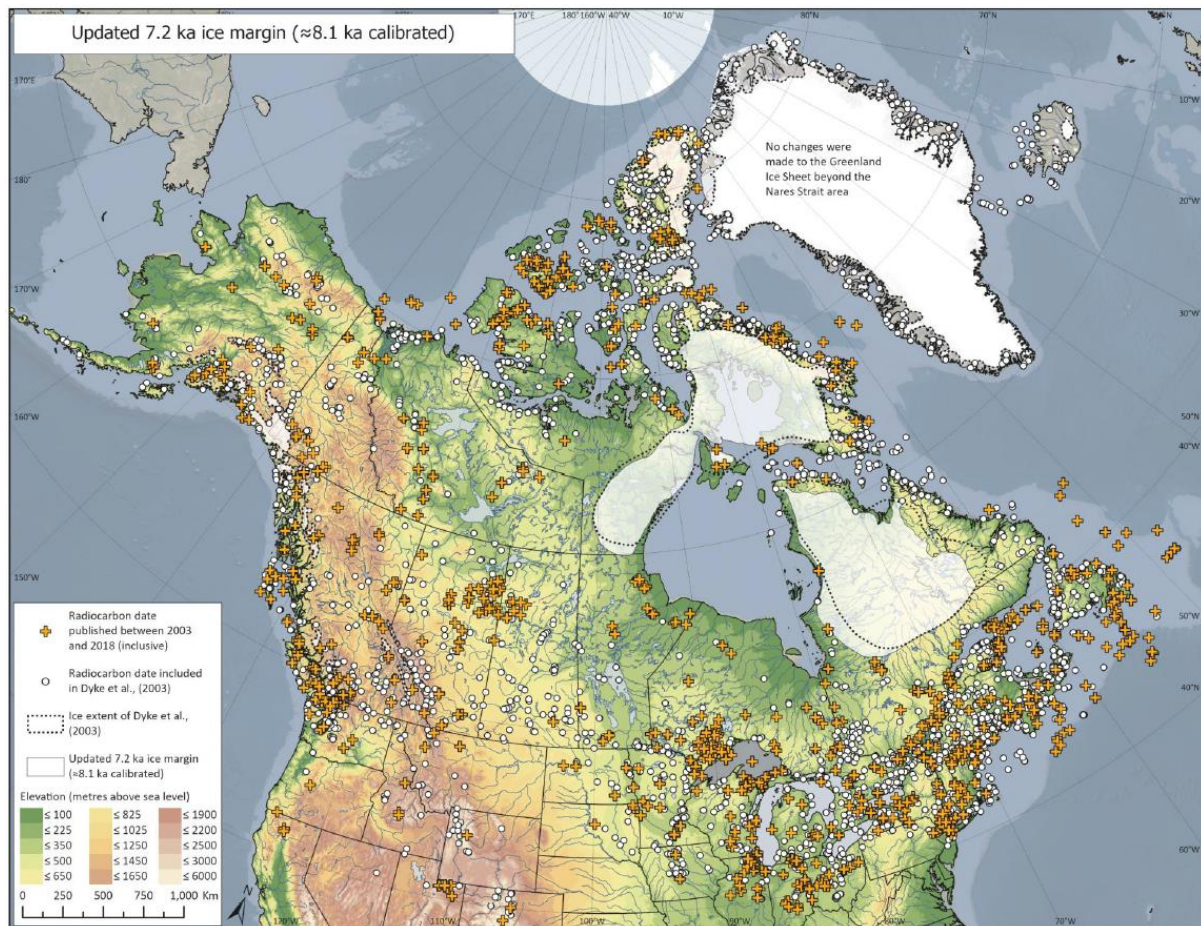


Figure 3: Carte de déglaciation de la calotte glaciaire laurentienne à 8 100 ans AA, au Québec. Source: Dalton et al., 2020.

L'est du Québec

L'expansion de la végétation

Phase non arboréenne

D'après les assemblages polliniques, le début de la période postglaciaire est marqué par une phase de végétation non arboréenne de toundra, résultant du retrait de l'inlandsis avant 11 000 ans AA (Fréchette et al., 2021; Feussom Tcheumeleu, 2023). Cette phase est principalement observée sur les sapinières actuelles à l'est du Québec (Figure 4), plus précisément en rives nord et sud du fleuve Saint-Laurent, ainsi qu'en côte sud et centre de la Gaspésie. Toutefois, certaines régions, telles que la pessière à mousse en Côte-Nord demeurent encore recouvertes par la glace durant cette même période. Les assemblages de cette première province pollinique sont dominés par les grains de pollen d'herbacées (avec un pourcentage

supérieur à 20%), avec quelques arbres et arbustes comme le bouleau, saule et pin gris (Fréchette et al., 2021).

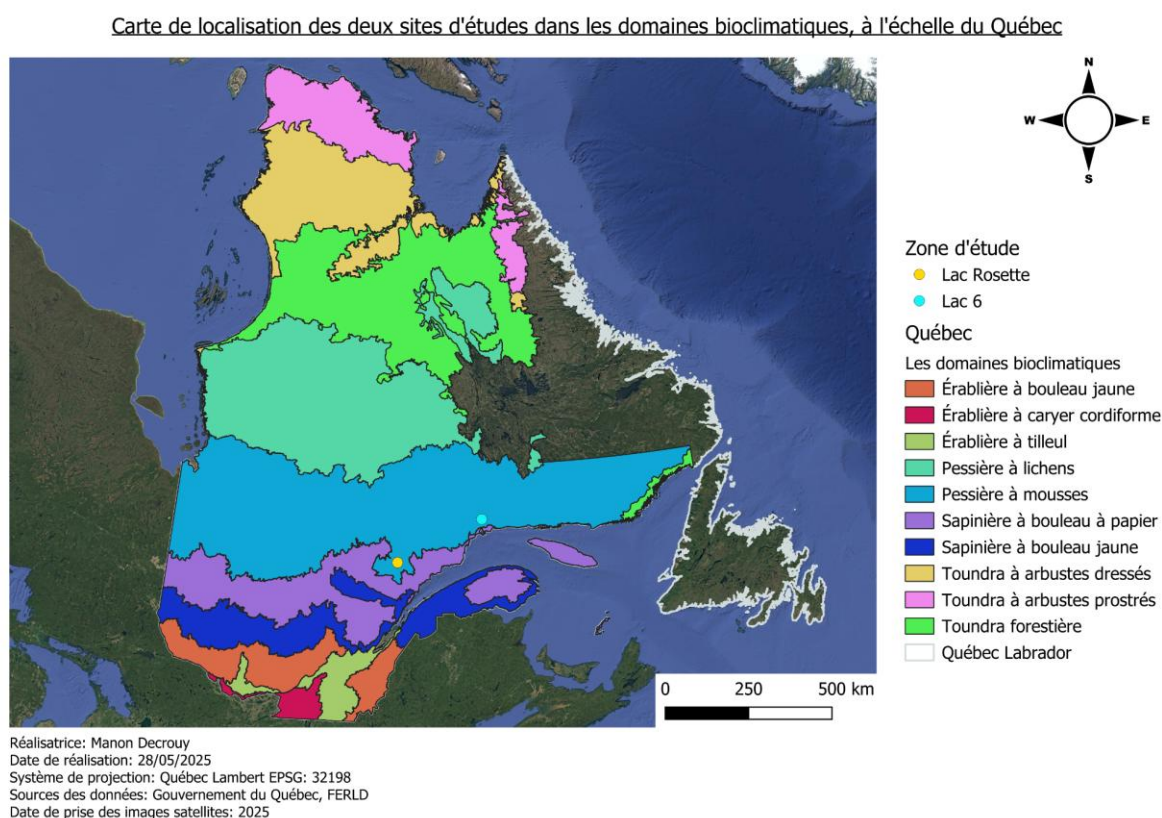


Figure 4: Carte des domaines bioclimatiques à l'échelle du Québec, localisation des deux sites d'études.

Phase d'afforestation

C'est entre 12 000 et 11 500 ans AA qu'une végétation de transition, composée de toundra herbacée - toundra arborée a pris place à proximité du fleuve Saint-Laurent, d'abord dominée par des herbacées, puis par des saules. En effet, selon (Fréchette et al., 2021), cette transition serait caractéristique de la phase d'afforestation il y a environ 11 000 ans AA, au sein des zones de sapinières. Cependant, cette période présente une asynchronie à l'échelle du Québec (Figure 5), en raison des fluctuations des périodes de retrait de la calotte glaciaire. Cette phase d'afforestation, spécifique des territoires de sapinières, est marquée par la dominance des taxons d'épinette noire, de peuplier, genévrier (*Juniperus*) et de bouleau, suivie d'un déclin de l'épinette noire et de saule vers 10 000 ans AA (Fréchette et al., 2021).

Dans les zones de pessières actuelles, l'afforestation a eu lieu entre 10 000 ans AA et 9 000 ans AA, avec une prédominance d'aulne crispé, de bouleau et de peuplier. Le climat sec et orageux à l'origine d'une grande incidence des feux de forêt a entraîné la régression des populations d'épinette noire dans le sud-est du Québec et en Gaspésie (Richard and Labelle, 1989; Asnong and Richard, 2003), générant une ouverture du couvert forestier, et laissant place au développement de l'aulne crispé (Richard and Labelle, 1989), qui selon Asnong and Richard, (2003) notifierait un climat peu humide.

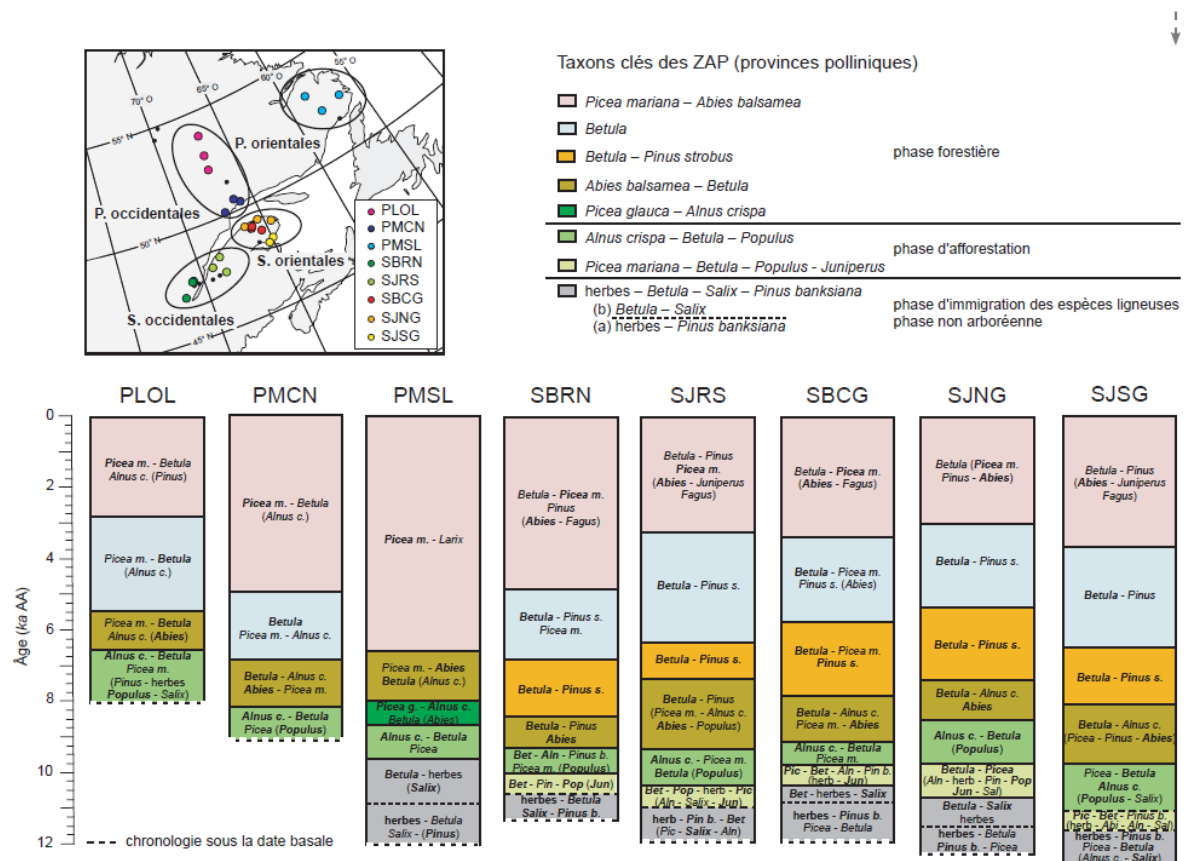


Figure 5: Chronologie de l'histoire postglaciaire de la végétation au sein des domaines bioclimatiques, à l'est du Québec. Source: Fréchette et al., 2021.

Certaines études suggèrent une phase d'afforestation plus tardive, aux alentours de 8 500 ans AA, dans les pessières à mousses à l'est du Québec, où l'épinette noire a progressivement colonisé les zones déglacées à la suite de la fonte de la calotte glaciaire laurentienne (Feussom Tcheumeleu et al., 2023). Cette même phase d'afforestation régionale est identifiée vers 8 250 ans AA dans la région de Sept-Îles en Côte-Nord. Cette période marque l'apparition d'une forêt arbustive ouverte, composée par l'aulne, l'épinette, le sapin et le

bouleau. Vers 7 250 ans AA, l'assemblage pollinique indique une transition vers une végétation de toundra arbustive, caractérisée par une diminution de l'aulne crispé et une augmentation du sapin, de l'épinette et du bouleau (Lemay-Tougas, 2014). Richard et al., (2020) précisent que la période d'afforestation la plus brève a été enregistrée dans la région de la Côte-Nord, s'étendant approximativement de 9000 à 8000 ans AA, avec le développement de la toundra forestière et de la pessière à lichens. À l'échelle du territoire québécois, cette phase s'est achevée entre 8500 et 7500 ans AA, en réponse à l'établissement de conditions climatiques chaudes et plus humides.

L'ouest du Québec

L'expansion de la végétation

Phase d'immigration des espèces

Les assemblages polliniques à l'ouest du Québec témoignent d'une immigration des espèces végétales au sud du territoire entre 12 000 et 9 500 ans AA (Fréchette et al., 2018), soit au tout début de la phase d'afforestation à l'est. En effet, à cette époque, une partie de la pessière à mousse et de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest du Québec, en particulier le territoire de l'Abitibi, était inondée par les eaux du lac proglaciaire Agassiz-Ojibway (Fréchette et al., 2021). Ce sont les grains de pollen de pin gris, d'épinette, de chêne (*Quercus* sp.), les herbacées et le pollen d'aulne crispé qui caractérisent le mieux l'assemblage de cette plus ancienne province pollinique (Fréchette et al., 2018).

Phase d'afforestation

Un contraste marqué apparaît entre les régions de l'ouest et de l'est du territoire. Cette différence est remarquée d'abord par un début de la phase d'afforestation plus précoce à l'ouest du Québec, débutant vers 9500 ans AA avec une végétation plus ouverte et hétérogène où le bouleau, le peuplier, le sapin et l'aulne crispé étaient les taxons dominants. L'abondance des feuillus, moins inflammables que les conifères, a favorisé un déficit de combustible, limitant l'allumage et la propagation des incendies, mais a pu favoriser des incendies importants et/ou sévères durant les années sèches (Pelletier et al., 2009; Magnan and Garneau, 2014). Vers 8 000 ans AA, une végétation de sapinière à bouleau blanc domine, ainsi que la pessière à mousse plus au nord du territoire. Cette phase prend fin plus tardivement qu'à l'est, vers 7 500 ans AA, avec une recrudescence du pin gris. Ce délai de 500 ans entre le début de la phase forestière

dans les secteurs est et ouest peut s'expliquer par le lac proglaciaire Ojibway dans l'ouest (Fréchette et al., 2018). Sa vidange dans la baie d'Hudson est datée vers 8 470 ans AA (Barber et al., 1999).

Le Maximum thermique de l'Holocène (HTM)

Dans l'est du Québec, plusieurs auteurs situent l'HTM entre 8 200 et 4 200 ans AA, (Walker et al., 2019; Fréchette et al., 2021; Feussom Tcheumeleu, 2023) période marquée par des températures estivales supérieures à celles d'aujourd'hui (Renssen et al., 2009; Renssen et al., 2012; Bajolle et al., 2018; Feussom Tcheumeleu, 2023; Lesven et al., in press). D'autres estiment le début de l'HTM entre 7 000 et 6 000 ans AA dans le nord-est du Canada (Renssen et al., 2009; Renssen et al., 2012), contrastant ainsi fortement avec le maximum de température observé dans le nord-ouest du Canada, où celui-ci coïncide avec le maximum d'insolation estivale induit par le forçage orbital entre 11 000 et 9 000 ans AA (Renssen et al., 2009; Renssen et al., 2012). Cependant, le moment, la durée et l'amplitude des changements de températures restent très variables selon le gradient est-ouest (Bajolle et al., 2018; Feussom Tcheumeleu, 2023; Lesven et al., in press). En effet, des reconstitutions basées sur les assemblages de chironomes suggèrent des températures pouvant atteindre entre 15,5 et 17°C, suggérant un réchauffement d'environ 2°C au niveau de la pessière à l'est du Québec, entre 7 000 et 4 000 ans AA (Feussom Tcheumeleu et al., 2023; Lesven et al., in press).

À partir de 9 000 ans AA, l'ouest était caractérisé par un climat plus chaud et plus sec qu'aujourd'hui (Ali et al., 2012; Fréchette et al., 2018), avec un réchauffement de 2 à 4°C survenu avant 8 000 ans AA (Viau and Gajewski, 2009; Fréchette et al., 2018), propice à une activité élevée des incendies (Carcaillet and Richard, 2000). De plus, les reconstitutions paléoclimatiques fondées sur l'analyse des chironomes dans l'ouest du Québec indiquent un réchauffement d'environ 3,5 °C survenu entre 8 200 et 7 800 ans AA (Lesven et al., in press).

L'est du Québec

La phase forestière

La phase d'afforestation, que certains chercheurs considèrent comme s'étant prolongée jusqu'au Maximum thermique de l'Holocène (Lemay-Tougas, 2014; Feussom Tcheumeleu et al., 2023) s'est accompagnée de transformations notables dans la composition de la végétation,

marquant la transition vers la phase forestière et la densification du couvert végétal entre 8000 et 7000 ans AA (Richard et al., 2020; Fréchette et al., 2021), voire jusqu'à 6700 ans AA (Feussom Tcheumeleu et al., 2023). À partir de 8100 les températures chaudes et humides, générant de petits feux fréquents, mais de faible sévérité (Ali et al., 2012; Feussom Tcheumeleu et al., 2023) ont favorisé l'établissement de forêts mixtes dominées par le sapin baumier et le bouleau sur les zones brûlées, notamment au sud de la région Côte-Nord. Plus localement, les forêts boréales de la région de Sept-Îles ont été dominées par le sapin baumier entre 8 000 et 6 500 ans AA, avec un pic d'abondance entre 8100 et 6700 ans AA (Feussom Tcheumeleu et al., 2023), en réponse à une diminution de la fréquence des incendies (Couillard et al., 2018).

À partir de 4 800 ans AA la sévérité des feux a progressivement augmenté (Ali et al., 2012), bien que leur occurrence soit restée relativement faible (Magnan and Garneau, 2014; Couillard et al., 2018; Couillard et al., 2021; Feussom Tcheumeleu et al., 2023). Cette tendance a conduit à un maximum de sévérité atteint autour de 6 000 ans (Girardin et al., 2013). Ces paramètres ont favorisé une transition progressive entre 5500 et 4000 ans AA d'une forêt mixte, dominée par le bouleau, l'épinette noire et le sapin baumier, vers une pessière à mousse dans laquelle l'épinette noire devient l'essence dominante (Lesven et al., in press) et le bouleau, espèce pionnière post-incendies (Couillard et al., 2021), créant des paysages plus inflammables (Feussom Tcheumeleu et al., 2023). Toutefois, le sud-est du Québec était marqué par des précipitations annuelles faibles, et une fréquence de feux minimale entre 6 500 et 4000 ans AA. Cette tendance a persisté jusqu'à environ 2 500 ans AA (Carcaillet and Richard, 2000).

Ce changement est asynchrone avec la transition de la période chaude du HTM et la période plus fraîche du Néoglaciale, suggérant ainsi que l'occurrence des feux n'est pas directement liée à la température estivale, et que d'autres facteurs entrent en jeu, comme l'augmentation de la fréquence des événements de précipitations estivales et de sécheresses de fin de printemps et d'été (Carcaillet and Richard, 2000). Néanmoins, la taille des feux est contrôlée par les températures printanières et potentiellement par l'abondance des espèces sujettes aux incendies (épinette noire, pin gris) (Ali et al., 2012), ainsi que par la potentialité d'un sol encore suffisamment humide au printemps pour inhiber l'étendue des feux (Ali et al., 2025).

L'ouest du Québec

Phase forestière

Plus à l'ouest, la phase forestière débute autour de 7000 ans AA, marquée par une densification progressive de la végétation, notamment par l'augmentation de l'abondance de l'épinette noire. Des espèces thermophiles, comme le pin blanc s'étendent sur le territoire, avec un pic pollinique entre 7000 et 5000 ans AA, ce qui témoigne d'un climat à la fois chaud et ensoleillé. En effet, l'ouest du Québec était sujet à des feux fréquents et vastes en raison de conditions sèches entre 7000 et 5000 ans AA. Entre 5500 et 4500 ans AA, la diminution des précipitations combinée à des températures plus élevées suggère des conditions sèches, favorables à une hausse de la fréquence des petits feux et à un allongement de la saison des incendies (Ali et al., 2012; Ali et al., 2025). Toutefois, cette intensité a diminué à partir de 6500 jusqu'en 5500 ans AA (Ali et al., 2012). Entre 6500 et 5500 ans AA, des espèces sensibles au feu, telles que le thuya occidental, deviennent plus fréquentes (Bajolle, 2018; Fréchette et al., 2018), indiquant une faible activité des feux (Bajolle, 2018). Vers 6000 ans AA, les sapinières à bouleau blanc constituaient les formations végétales les plus abondantes dans l'ouest du territoire avec leur composante de thuya occidental (Richard et al., 2020).

Le Néoglaciaire

Le Néoglaciaire est caractérisé par une diminution constante de l'insolation estivale (Ali et al., 2012). Cette période est asynchrone entre l'ouest et l'est du Québec, avec un commencement vers 5 000 ans AA à l'ouest du Québec (Carcaillet and Richard, 2000), tandis qu'à l'est le Néoglaciaire est retardé jusqu'à 4 000 ans AA, avec un refroidissement allant de 4 à 6°C (Lesven et al., in press). Cette période est caractérisée par des conditions climatiques plus humides que précédemment, et une baisse notable des températures (Asnong and Richard, 2003; Wanner et al., 2015; Fréchette et al., 2021; Lesven et al., in press). Durant cette période, le climat froid s'est accompagné d'une augmentation des précipitations et des épisodes orageux (Richard et al., 2020), ainsi qu'une diminution de l'évaporation et de l'évapotranspiration, générant des conditions favorables à l'occurrence des incendies de forte sévérité (Carcaillet and Richard, 2000; Girardin et al., 2013). La fréquence des incendies et la combustion totale de la biomasse étaient contrôlées par l'insolation estivale et les précipitations annuelles, tandis

que la taille des feux dépendait des températures printanières et de l'abondance des espèces sérotineuses (épinette noire, pin gris) (Ali et al., 2012; Ali et al., 2025).

L'est du Québec

L'intervalle de temps de 4 200 à 3 500 ans AA est vu comme une période de transition du HTM au Néoglaciale à travers l'est du Québec (Feussom Tcheumeleu et al., 2023). Des enregistrements réalisés par Magnan and Garneau, (2014), basés sur des thèques amibiens au Havre Saint-Pierre notent une accélération de l'humidité annuelle aux alentours de 3 000 ans AA. Durant cette période, les incendies étaient peu fréquents, mais de forte sévérité (Magnan and Garneau, 2014). L'augmentation de la taille/sévérité des feux et le refroidissement associé ont été particulièrement favorables au développement des conifères boréaux sérotineux comme l'épinette noire, augmentant ainsi l'accumulation de combustibles et l'inflammabilité des paysages (Feussom Tcheumeleu, 2023). En effet, le régime des incendies dans l'est du Québec était caractérisé par de longs intervalles de retour du feu, pouvant dépasser 500 ans, entre 2 000 et 1 800 ans AA (Bouchard et al., 2008). Cette activité incendiaire de grande taille a entraîné une diminution importante du sapin baumier dans les domaines de la pessière à lichens et de la pessière à mousse au Québec et au Labrador (Richard et al., 2020; Ali et al., 2025). Par ailleurs, au-delà de l'influence des feux, le gradient latitudinal présente un fort contraste de températures, de manière à ce que l'on retrouve majoritairement des forêts fermées au sud du Québec et une prédominance des forêts ouvertes au nord (Richard et al., 2020). En Gaspésie et dans le Bas-Saint-Laurent, la forte sévérité des feux a généré une régression de l'épinette noire, tandis que l'aulne crispé s'est multiplié en raison d'une ouverture du couvert forestier (Richard and Labelle, 1989; Fréchette et al., 2021). Ce phénomène d'ouverture du paysage a été remarqué dans l'ensemble du territoire, notamment dans le domaine bioclimatique de la pessière à mousse en Côte-Nord, où l'épinette noire domine aux dépens du bouleau et de l'aulne crispé (Fréchette et al., 2021).

L'ouest du Québec

À l'ouest, la période du Néoglaciale s'est établie vers 5000 ans AA (Bajolle et al., 2018), avec des étés frais et secs (Carcaillet and Richard, 2000). Vers 3 000 ans AA, la fréquence et la sévérité des feux ont augmenté avec de courts intervalles sans feu (Carcaillet et al., 2001). Toutefois, cette activité demeure plus faible qu'avant 7 500 ans AA (Carcaillet and Richard, 2000). Entre 3 500 et 1 000 ans AA, les plus grands incendies se sont produits à l'ouest

du Québec, contribuant à l'augmentation dans le paysage de pin gris et d'épinette (Remy et al., 2017; Fréchette et al., 2018; Richard et al., 2020). Ces conditions ont engendré le déclin du sapin baumier dans les forêts de conifères (Carcaillet and Richard, 2000), tandis que le bouleau a prospéré, jusque vers 3 500 ans AA (Fréchette et al., 2018). En effet, les sapinières à bouleau blanc ont dominé l'ouest du Québec, plus particulièrement l'Abitibi-Témiscamingue jusqu'à 4 000 ans AA (Richard et al., 2020).

3. Variabilité séculaire au cours du Néoglaciale

Événements climatiques rapides de la période Néoglaciale

Période Chaude romaine

La période chaude romaine, datée entre 1 850 et 1 650 ans AA, est caractérisée par des étés chauds et secs au Québec (Delwaide et al., 2021), avec un réchauffement ayant atteint les 2°C (Lesven et al., in press). Cette époque climatique a été en partie influencée par une diminution de l'insolation et par l'affaiblissement des interactions océan-atmosphère, y compris par une phase négative de l'oscillation nord-atlantique (Helama et al., 2017).

Anomalie Climatique Médiévale

Dans le sud-est du Canada, situé à la limite des Hautes Terres du Nouveau-Brunswick et des Basses Terres du Nouveau-Brunswick, seule l'étude de (Collins et al., in press) s'est intéressée à l'impact de la variabilité climatique rapide du dernier millénaire sur la végétation et les feux de forêt. Cette étude situe l'Anomalie Climatique Médiévale (ACM) entre 1 050 et 550 ans AA, avec une température moyenne au printemps de 3,2°C (Collins et al., in press), avec des étés chauds et des hivers doux (Delwaide et al., 2021). Cette période est marquée par un réchauffement des températures avec une valeur maximale moyenne d'environ + 1,3°C, vers 1 100 ans AA, dans l'est du Canada (Bajolle, 2018). Durant cette période, le climat chaud et sec favorise la présence de feuillus, avec comme taxon dominant le bouleau, accompagné de hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.). Les conifères sont quant à eux peu représentés, avec une faible abondance d'épinette, de la pruche du Canada (*Tsuga canadensis* (L.) Carrière, 1855) et de pin (Collins et al., in press). Cette composition riche en feuillus inhibe le déclenchement d'événements de feux, car les arbres feuillus caducs sont généralement moins inflammables que les conifères en raison de la plus grande teneur en humidité de leurs feuilles

par rapport aux aiguilles de conifères (Park et al., 2024). En effet, les intervalles de retour de feu à cette époque étaient relativement courts, d'environ 150 ans (Collins et al., in press).

Petit Âge Glaciaire

Le Petit Âge Glaciaire est caractérisé par une baisse des températures d'environ 1 à 1,5°C par rapport à l'Anomalie Climatique Médiévale (Gajewski et al., 2023; Collins et al., in press; Lesven et al., in press). Les températures estivales ont également été reconstituées à partir des cernes de l'épinette noire dans la forêt boréale du nord-est de l'Amérique du Nord, et ont montré que cette période est la plus froide des 1100 dernières années (Gennaretti et al., 2014). À l'est du Québec le PAG est situé entre 500 et 100 ans AA (Delwaide et al., 2021; Collins et al., in press) et plus à l'ouest cette période est datée aux alentours de 500 à 250 ans AA (Bajolle, 2018), avec un climat plus froid et sec qu'aujourd'hui (Bergeron and Archambault, 1993).

Dans la région du Nouveau-Brunswick, les forêts étaient majoritairement composées de conifères, avec le pin gris comme essence dominante (Collins et al., in press). Le pin blanc, l'épinette noire, l'épinette rouge (*Picea rubens* Sarg., 1898) et le sapin baumier y étaient présents en tant qu'essences sous-dominantes. Ceci est expliqué par des feux fréquents (intervalles de retour du feu de 43 ans), qui auraient contribué au déclin du bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton, 1903), du hêtre à grandes feuilles et de la pruche du Canada, des espèces intolérantes au feu et successeurs tardifs (Collins et al., in press). Dans le sud-ouest du Québec, le développement des épinettes s'observe en parallèle du déclin du hêtre à grandes feuilles et de la pruche du Canada (Paquette and Gajewski, 2013; Lafontaine-Boyer and Gajewski, 2014). L'épinette noire était l'arbre dominant dans les assemblages polliniques à travers l'est du Québec, tandis que l'occurrence des incendies et la combustion de la biomasse étaient relativement faibles (Feussom Tcheumeleu et al., 2023).

Réchauffement actuel

De nos jours, la température globale a augmenté en moyenne de 1,5°C depuis l'ère postindustrielle, du fait d'une hausse des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère, conséquence des activités humaines (Field et al., 2014; IPCC, 2022). Cette hausse des températures est à l'origine de taux d'évapotranspiration plus élevés, qui ne sont pas entièrement compensés, malgré les augmentations concomitantes des précipitations (Tam et al., 2019). De plus, depuis la fin du 19^{ème} siècle, une augmentation est notable de la croissance

de l'épinette noire dans l'hémisphère nord (Wilson et al., 2016). À la fin du PAG, une diminution de la fréquence des incendies a été observée dans l'est du Canada en raison d'une augmentation de l'humidité estivale associée au réchauffement climatique (Bergeron and Archambault, 1993). Dans le futur et déjà aujourd'hui, l'augmentation de la taille et de la fréquence des feux associée devraient mener à d'importants changements dans la végétation dans l'est du Canada, notamment des épisodes de mortalité de l'épinette noire (D'Orangeville et al., 2016; D'Orangeville et al., 2018; Lesven et al., in press) et d'importants échecs de régénération (Lesven, 2024). Ces différents facteurs vont donc influencer la répartition et l'abondance de certaines espèces végétales, notamment le sapin baumier à l'est du Québec (Saucier et al., 2010; Couillard et al., 2019; Grondin et al., 2023).

III. Matériel et méthodes

1. Aire d'étude et caractéristiques des lacs

Cette étude a été menée à l'ouest de la région administrative de la Côte-Nord, dans la province de Québec. Cette région s'étend sur 351 523 km². Les lacs étudiés se situent dans le domaine bioclimatique de la pessière à mousse de l'est du Québec, qui s'insère dans la forêt boréale continue, proche de l'écotone avec le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc (Saucier, 2011) (Figure 4). Le couvert forestier aux alentours des lacs est dominé par l'épinette noire et le sapin baumier. L'épinette blanche, le mélèze laricin, le peuplier faux-tremble et le bouleau à papier y sont également présents, en plus faible abondance.

A. Lac 6

Le lac 6 (50°31'45.6"N, 66°25'25.2"W) (Annexe 2) couvre une superficie de 40,7 ha avec une profondeur d'eau de 37,2 m, tapissé d'un sédiment mou. Il s'élève à une altitude de 413 m au-dessus du niveau de la mer, dans la municipalité de Lac-Walker, proche de la région de Sept-Îles (Figure 6). La proximité avec le golfe du Saint-Laurent (44 km de distance) génère un climat froid et humide, avec des précipitations annuelles moyennes de 1024,4 mm, des précipitations annuelles moyennes de neige de 428,9 mm et une température annuelle moyenne de -0,34°C entre 1981 et 2020. Le plan d'eau est entouré d'une forêt dominée principalement par l'épinette noire et le sapin baumier (Wilke, 2024). Plusieurs lacs au sud de la région de

Sept-Îles ont été particulièrement touchés par une épidémie de TBE entre 2020 et aujourd’hui. Toutefois, aucun dommage visible n’a été remarqué à proximité immédiate du lac 6.



Figure 6: Carte de localisation du lac Rosette au Québec.

L'intervalle de retour du feu, relativement long dans cette région, peut atteindre entre 295 et 500 ans (Bouchard et al., 2008; Portier et al., 2016), voire jusqu'à 600 ans (Portier et al., 2016) (Figure 7). Au cours des dernières décennies, les tailles d'incendie étaient relativement petites, avec un faible taux de combustion de la biomasse brûlée (0,2-0,4 %/an) et une fréquence de 0,64 Mha/an (Erni et al., 2020). Par ailleurs, en juin 2023, le nord-est des bassins hydrographiques étudiés dans la région de Sept-Îles a été brûlé par deux grands feux de forêt : le premier incendie (50,37 °N, 66,38 °W) a brûlé environ 957 ha, tandis que le second (50,62 °N, 66,01 °W) a brûlé une superficie d'environ 36 290 ha (Copernicus, 2023; Natural Resources Canada, 2023) (Figure 8) (Annexe 1).

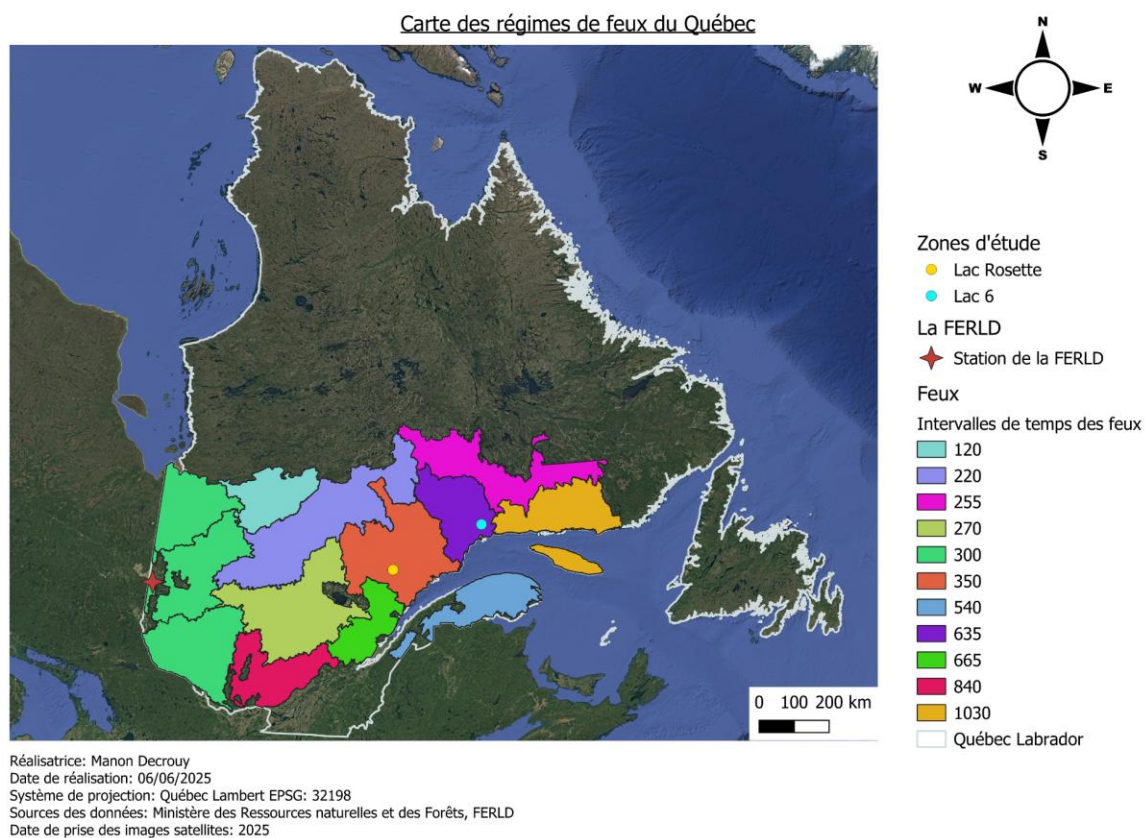


Figure 7: Carte de l'intervalle de retour de feu au Québec.

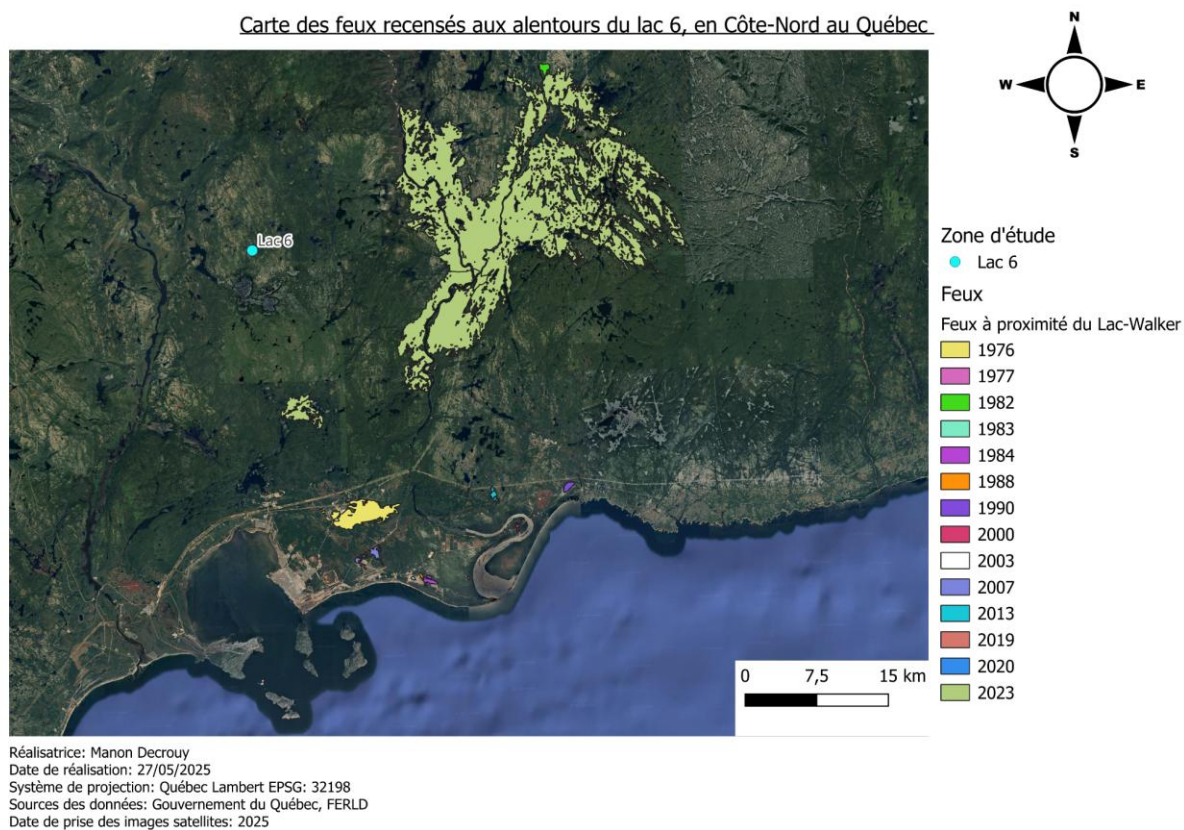


Figure 8: Carte des feux recensés aux alentours du lac 6, en Côte-Nord, Québec.

B. Lac Rosette

Le Lac Rosette (49°21'39.5"N, 69°59'04.9"W) (Annexe 3) situé à 468 m au-dessus du niveau de la mer, couvre une superficie de 6,7 ha et atteint une profondeur d'eau maximale de 15 m. Il se trouve sur le territoire ancestral (Nitassinan) des Innus de Pessamit, ce dernier s'étendant sur une superficie de 137 829 km² (Affaires autochtones et Développement du Nord Canada and Conseil des Montagnais du Lac Saint-Jean, 2012). Le lac Rosette est davantage éloigné du golfe du Saint-Laurent, d'une distance de 99 km (Figure 9). Ce paramètre lui confère un climat plus chaud et moins humide que pour le lac 6, avec une température annuelle moyenne de 0,63°C entre 1981 et 2020, des précipitations annuelles moyennes de 972,7 mm et des précipitations annuelles moyennes de neige de 339,6 mm. La végétation observée autour du lac est principalement composée d'épinette noire, de sapin baumier, d'aulne et de patches de peuplier.

Cartes de la localisation du Lac Rosette au Québec

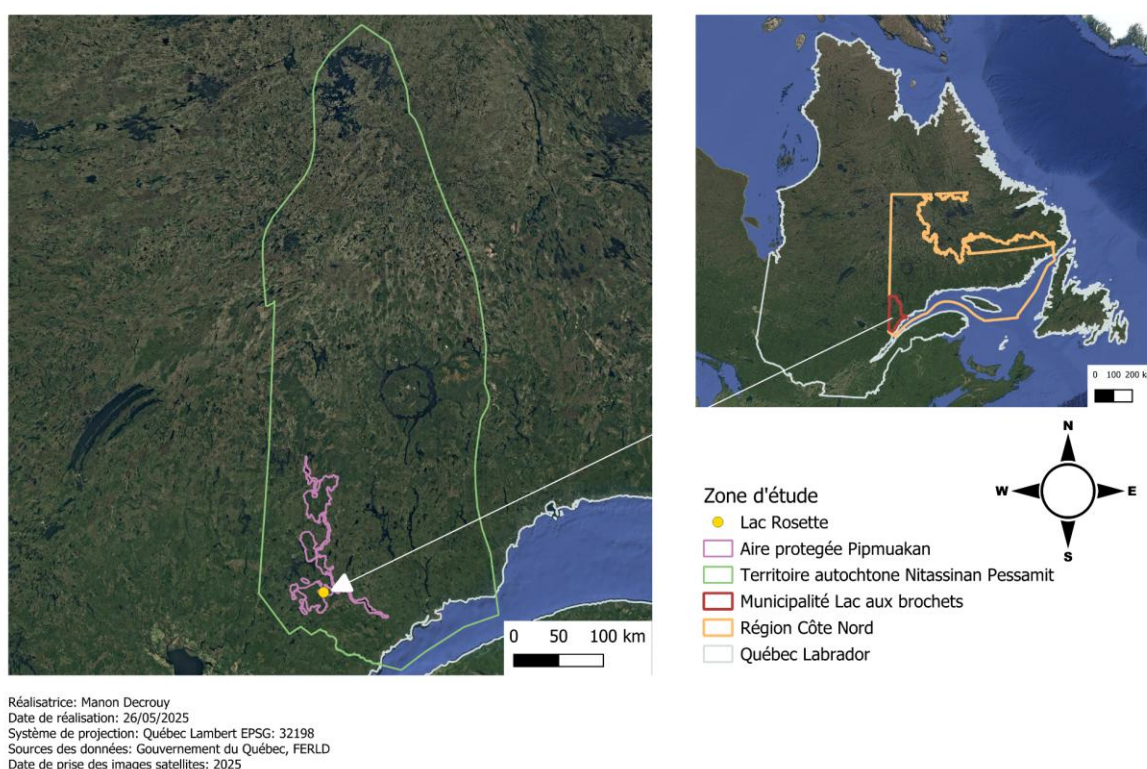


Figure 9: Carte de la localisation du lac Rosette, en Côte-Nord, Québec.

L'intervalle de feu dans ce secteur peut atteindre des périodes plus ou moins longues, allant de 300 (Feussom Tcheumeleu, 2023; Lesven, 2024) à 350 ans (Couillard et al., 2021)

(Figure 7). En parallèle de ces informations, plusieurs feux se sont déclenchés à moins de 30 km du lac, durant les années 1976, 1987, 1988, 1991, 1996, 2003, 2010 et 2023. Les plus grands sont survenus en 1987 sur 481,1 ha, en 1991 sur 195 284,4 ha et en 2023 sur 12 397,3 ha (Gouvernement du Québec, 2025) (Figure 10) (Annexe 1).

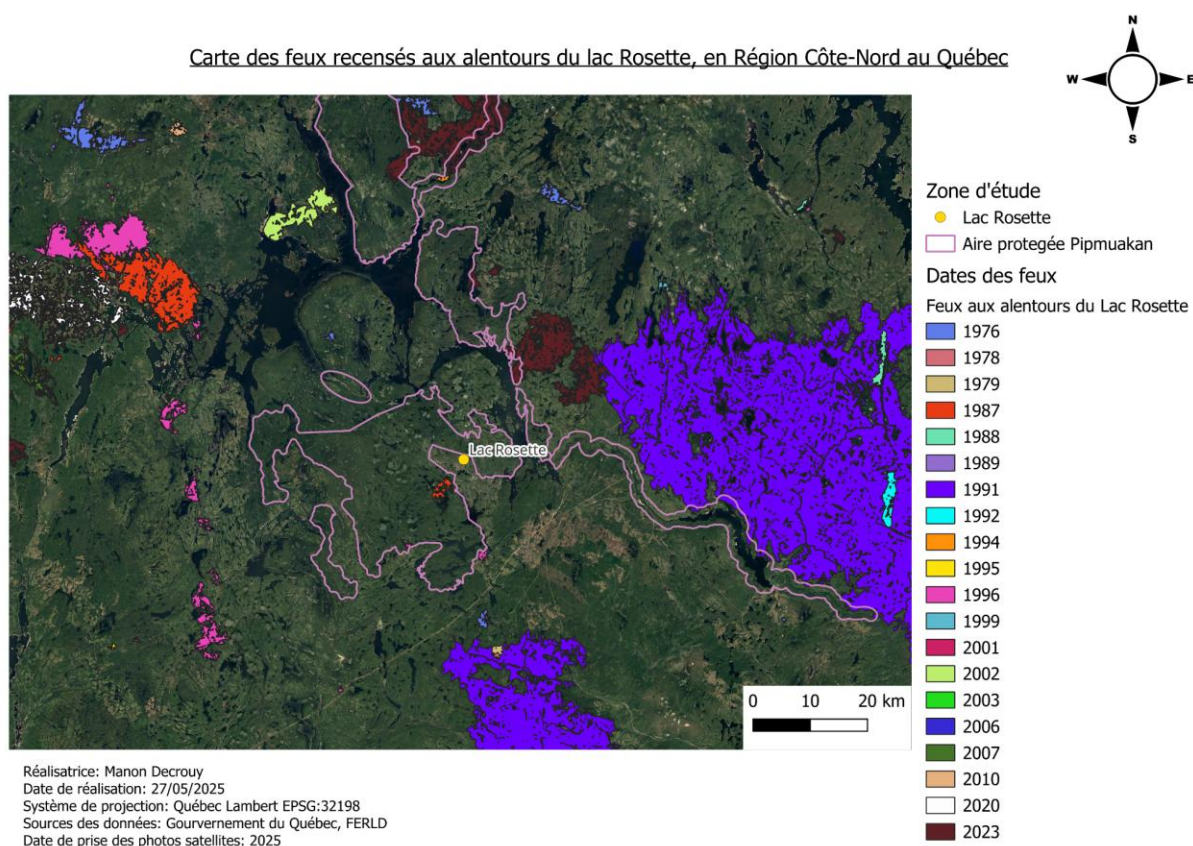


Figure 10: Carte des feux recensés aux alentours du lac Rosette, en Côte-Nord, Québec.

2. Récolte des carottes sédimentaires

Au cours de l'hiver 2024, une campagne de carottage a été menée dans dix lacs situés le long d'un gradient latitudinal d'environ 30 km au nord de la ville de Sept-Îles. Pour le lac 6, la carotte a été prélevée entre le 17 et 19 février. La glace atteignait alors une épaisseur de 60 cm, et une carotte de 84,5 cm de sédiments a pu être extraite. Le lac Rosette fait partie d'un autre programme d'échantillonnage, le long d'un gradient longitudinal d'environ 40 km, situé au nord-ouest du territoire ancestral des Innus de Pessamit. Le carottage s'est effectué le 4 août 2024, durant lequel ont été extraits 45 cm de sédiments.

Des carottes sédimentaires ont été prélevées au point le plus profond de chacun des deux lacs étudiés à l'aide d'un carottier gravitaire UWITEC de 90 mm de diamètre. Ensuite, les sédiments ont été sous-échantillonnés sur place en sections de 0,5 cm d'épaisseur, stockés dans des sacs en plastique, puis conservés au réfrigérateur à 4 °C, à l'abri de la lumière afin d'éviter leur altération.

3. Chronologies

Afin d'assurer une chronologie précise au cours des 150 dernières années, l'activité du ^{210}Pb a été mesurée sur les 15 premiers centimètres de chaque carotte sédimentaire (Le Roux and Marshall, 2011). Afin d'obtenir l'âge de chaque échantillon, un modèle à taux d'accumulation constant a été appliqué (Appleby et al., 1979). Bien qu'elle soit particulièrement adaptée aux environnements caractérisés par une accumulation sédimentaire stable et régulière, cette méthode peut également être appliquée dans des contextes où les taux de sédimentation sont moins uniformes (Appleby, 2001). Pour les sédiments plus anciens, deux dates au radiocarbone basées sur des macrorestes de plantes ont été réalisées, en utilisant la spectrométrie de masse accélérée (AMS). Les données ont été calibrées à 2σ en âge calendaire à l'aide de la courbe de calibration Intcal20, pour les matériaux terrestres de l'Hémisphère Nord (Reimer et al., 2020). Le modèle âge-profondeur de chaque carotte sédimentaire a été obtenu à l'aide du package rplum v.0.4.0 (Blaauw and Lopez, 2023) dans l'environnement R. Basé sur une approche bayésienne, le package rplum permet d'intégrer les incertitudes associées à la datation au ^{210}Pb et au ^{14}C dans la modélisation de la relation entre l'âge et la profondeur (Annexe 4). Les âges ont ensuite été interpolés linéairement tous les 0,5 cm. Toutes les dates sont exprimées en âges calibrés avant le présent (cal. yrs. BP) (Annexes 5 et 6).

4. Analyse pollinique

A. Extraction des grains de pollen

Des échantillons d' 1 cm^3 ont été prélevés à intervalles réguliers sur chaque carotte sédimentaire, afin d'extraire les palynomorphes et permettre une reconstitution des variations de la végétation au cours du temps. Ces échantillons ont été traités chimiquement en suivant le

protocole standard pour les échantillons terrestres (Faegri and Iversen, 1975). Tout d'abord, quatre pastilles composées de carbonate de sodium, polyéthylène glycol et d'une concentration connue de spores de lycopodes (*Lycopodium clavatum* L.) ont été ajoutées à l'échantillon. Pour dissoudre le carbonate de calcium présent dans les pastilles, de l'acide chlorhydrique (HCl) concentré à 37% a été ajouté. Puis chaque tube a été complété par de l'acide chlorhydrique 10%, suivi d'une étape de centrifugation. Après rinçage, de l'hydroxyde de potassium (KOH) a été incorporé afin de dissoudre la matière organique présente. Plusieurs nettoyages à l'eau par centrifugation ont été répétés, afin d'enlever les résidus des produits chimiques. Ensuite, une filtration a été effectuée à l'aide d'un tamis de 160 μm , pour retenir les macrorestes (racines, mousses, etc) qui n'auraient pas été dissous et laisser passer les grains de pollen, dont les plus gros peuvent aller jusqu'à environ 100 μm , comme le sapin baumier. Une fois filtrés, les échantillons ont été déshydratés avec de l'acide acétique ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$) pour permettre la réalisation de l'étape d'acétolyse. Pour cela, un mélange acétolytique a été réalisé à l'aide d'acide sulfurique (H_2SO_4) et d'anhydride acétique ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_3$). Celle-ci permet de colorer l'exine des grains de pollen afin de faciliter leur identification au microscope. En effet, l'exine est formée de sporopollénine, permettant au pollen de résister à la dégradation. Une fois ces manipulations terminées, une dernière étape a été effectuée à l'aide d'éthanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) afin de déshydrater le sédiment et le fixer sous forme d'un culot lors de la centrifugation. Une fois l'éthanol évacué, les grains de pollen ont été placés dans des microtubes pour être stockés dans une solution de glycérol ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$), jusqu'à leur montage entre lame et lamelles pour les identifier au microscope.

B. Identification et comptage des grains de pollen





Les palynomorphes ont été montés entre lame et lamelle mobile. Puis au microscope, à un grossissement de $\times 400$, les lames de chaque échantillon ont été analysées selon un balayage linéaire. En effet, pour éviter tout biais dans la représentation des grains de pollen lors du montage des lames, un transect est effectué au centre de la lame et un second sur un bord (Gottardini et al., 2009). Dans cette étude, un total de 400 grains de pollen a été effectué pour chaque échantillon, permettant d'obtenir une représentation fiable de la végétation (Djamali and Cilleros, 2020). L'identification des grains de pollen et spores a été réalisée à l'aide de l'atlas pollinique de Richard, (1970) ainsi que par la clé de détermination de pollen et spores de McAndrews et al., (1973), qui ont permis d'appuyer la distinction entre les différentes morphologies. En effet, chaque palynomorphe possède des caractéristiques spécifiques

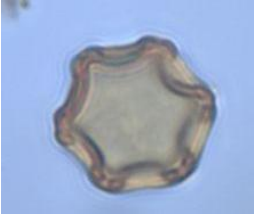



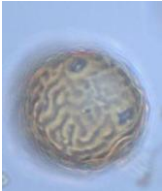

d'identification permettant de les distinguer. Certains conifères sont pourvus de deux ballonnets reliés à un corps tels que le sapin baumier, l'épinette noire, l'épinette blanche, le pin blanc ou encore le pin gris. D'autres possèdent un corps rond, entouré d'une exine simple comme le mélèze laricin ou d'une exine boursouflée telle que la pruche du Canada.






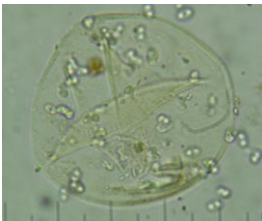

Chez les feuillus, l'ornementation de la surface du grain de pollen constitue un critère d'identification important : certains grains en sont dépourvus, tandis que d'autres présentent une ornementation granulée, réticulée ou échinulée. La forme générale du grain, le nombre, la présence ou l'absence d'ouvertures (pores et/ou sillons), ainsi que la morphologie globale permettent d'affiner la résolution taxonomique, jusqu'à la famille, au genre, voire à l'espèce ou à la sous-espèce dans certains cas rares (Tableau 1).



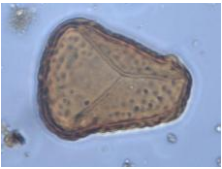
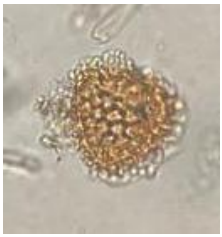
Enfin, il est également possible d'observer des spores lors des comptages palynologiques. Les types les plus fréquemment rencontrés sont les spores monolètes d'isoètes, reconnaissables à la présence d'une seule laesura (ligne visible sur la surface de la spore), et les spores trilètes, caractérisées par une laesurae triradiée. Les lycopodes se distinguent par une morphologie singulière, marquée par une exine alvéolaire, ce qui permet de différencier aisément leurs spores du pollen et des autres types de spores, limitant ainsi les risques de confusion taxonomique.

Tableau 1: Description des grains de pollen

Grains de pollen majoritairement observés		Caractéristiques	Critères d'identification
Épinette noire (<i>Picea mariana</i>)		Apertures : Aucune Ornementation: Finement granulée	<ul style="list-style-type: none"> - Deux ballonnets inclus dans l'exine - Exine épaisse
Sapin baumier (<i>Abies balsamea</i>)		Apertures : Aucune Ornementation: Finement granulée	<ul style="list-style-type: none"> - Grain de pollen de grande taille (environ 100 µm) - Exine épaisse, variant d'épaisseur - Deux ballonnets détachés du corps du grain
Bouleau (<i>Betula</i> sp.)		Apertures: Triporé Ornementation: Peu marquée	<ul style="list-style-type: none"> - Présence d'un vestibule dans chaque pore - Forme triangulaire - Exine épaisse
Aulne rugueux (<i>Alnus incana</i> ssp. <i>rugosa</i>)		Apertures: Stéphanoporé Ornementation: Peu marquée	<ul style="list-style-type: none"> - Arcs épais et recourbés, reliant les 5 pores - Pas de vestibule - Exine épaisse

<p>Aulne crispé <i>Alnus alnobetula</i> <i>ssp. crispa</i>)</p>		<p>Apertures: Stéphanopore Ornementation: Peu marquée</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Arcs généralement fins et peu recourbés reliant les 4, 5 voire 6 pores - Pas de vestibule - Petite taille par rapport à <i>Alnus incana</i> <i>ssp. Rugosa</i>
Grains de pollen moins remarquables		Caractéristiques	Critères d'identification
<p>Ericacée (Ericaceae)</p>		<p>Apertures: Tricolpé Ornementation: Peu marquée</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Grain de pollen en tétrade - Assemblage de 4 grains de pollen en forme triangulaire
<p>Hêtre (<i>Fagus</i> sp.)</p>		<p>Apertures: Tricolporé Ornementation: Granulée</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Pores plus larges que le sillon, de grande taille - Sillons fins et courts
<p>Erable (<i>Acer</i> sp.)</p>		<p>Apertures: Tricolporé Ornementation: striée</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Sillons longs, larges et profonds - Exine épaisse
<p>Orme (<i>Ulmus</i> sp.)</p>		<p>Apertures: Stéphanopore Ornementation: Cérébriforme</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de vestibule - Forme arrondie - Pores non saillants
<p>Pruche du Canada (<i>Tsuga canadensis</i>)</p>		<p>Apertures: Aucune Ornementation: Déformée par des fentes et des plis</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Exine épaisse et boursouflée - Grande taille (> 80 µm)

Astéracées (Asteraceae)		Apertures: Tricolporé Ornementation: Echinulée	- Forme sphérique
Frêne (<i>Fraxinus</i> sp.)		Apertures: Stéphanocolpé Ornementation: Finement réticulée	- Sillons longs et fins
Chêne (<i>Quercus</i> sp.)		Apertures: Tricolpé/Tricolporoïdé Ornementation: Granulée	- Sillons fins et longs - Forme ovale, souvent aplatie aux pôles
Amaranthacée (Amaranthaceae)		Apertures: Périporé Ornementation: Peu marquée	- Exine interrompue au niveau des pores
Épinette blanche (<i>Picea glauca</i>)		Apertures: Aucune Ornementation: Peu marquée	- Exine fine - Plus grande taille que l'épinette noire - Les ballonnets sont inclus dans l'exine du corps.
Mélèze laricin (<i>Larix laricina</i>)		Apertures: Aucune Ornementation: Peu marquée	- Grain de pollen sphérique
Pin gris (<i>Pinus banksiana</i>)		Apertures: Aucune Ornementation: Peu marquée	- Deux ballonnets détachés du corps - Petite taille - Exine du corps simple

Pin blanc (<i>Pinus strobus</i>)		Apertures: Aucune Ornementation: Peu marquée	<ul style="list-style-type: none"> - Deux ballonnets globuleux et détachés du corps - Le corps est pourvu d'une exine sinueuse
Spores et lycopodes		Caractéristiques	Critères d'identification
Isoète (<i>Isoetes</i>)		Marque monolète Ornementation: Peu marquée	<ul style="list-style-type: none"> - Présence d'un voile autour de la marque monolète
Trilète		Présence d'une marque trilète Ornementation: Peu marquée	<ul style="list-style-type: none"> - Laesura triradiée - Régulièrement présente une forme triangulaire
Lycopodes		Présence d'une marque trilète Ornementation: Peu marquée	<ul style="list-style-type: none"> - Forme sphérique - Sculpture alvéolaire

5. Reconstitution de la dynamique de végétation

À la suite du comptage et de l'identification des grains de pollen, l'abondance relative de chaque taxon a été calculée. Celle-ci correspond au pourcentage de chaque morphotype sur le total des taxons (= nombre de grains de pollen d'une espèce / somme pollinique*100). Une fois les données obtenues, des diagrammes d'abondance relative des taxons ont été tracés pour chaque lacs, à l'aide du package "rioja" v.1.0-5 (Juggins and Juggins, 2020), afin de faciliter l'interprétation visuelle des enregistrements polliniques. Des zonages ont ensuite été définis à partir des comptages transformés par Hellinger, en effectuant un regroupement par somme de carrés incrémentale contrainte (CONISS) (Grimm, 1987). Pour chaque carotte, le nombre de zones d'assemblage pollinique statistiquement significatif a été déterminé en appliquant le modèle de bâton brisé (Havayarimana et al., 2013) (Annexe 7).

6. econstitutions quantitatives des températures estivales

Les données climatiques de la région durant le Néoglaciale ont été obtenues à partir des reconstitutions de Lesven et al., (in press), basées sur les assemblages de chironomes. Dans cette étude, les températures estivales ont été reconstituées à l'aide d'un modèle de régression par moindres carrés partiels pondéré par la tolérance, avec deux composantes et une correction de fréquence par classe appliquée aux variables climatiques de l'ensemble d'apprentissages (fxTWA-PLS ; Liu et al., 2023). Le jeu de données d'entraînement était basé sur l'étude de Suranyi et al., (2025). Enfin, les températures estivales ont été lissées à l'aide d'une régression loess (pente = 0,25), afin de les comparer avec les reconstitutions historiques des feux et de la végétation.

7. Reconstitution des variables de feu

La reconstitution des incendies a été réalisée à partir des données de macrocharbons issues de deux sites : le site de Sept-Îles, pour lequel les analyses ont été effectuées par (Wilke, 2024), et le lac Rosette, étudié par Dorian Gaboriau. Une première phase en laboratoire a dû être réalisée pour chaque carotte sédimentaire. Tout d'abord, les particules de charbon ont été dénombrées et mesurées. Un sous-échantillon de 1 cm³ a été prélevé tous les demi-centimètres sur les carottes sédimentaires, et traité dans une solution composée d'hydroxyde de potassium (KOH), d'hypochlorite de sodium (NaClO) et d'hexamétaphosphate de sodium (Na(PO₃)₆). Cette solution a été placée pendant 24 heures sur une table agitatrice à température ambiante afin de défloculer les particules et de blanchir la matière organique. La solution a ensuite été tamisée à l'aide d'un tamis de 160 µm afin d'isoler les fragments de charbon de bois macroscopiques, représentatifs des événements de feux locaux autour des sites d'étude (Lynch et al., 2004; Oris et al., 2014; Hennebelle et al., 2020). Les particules retenues ont été triées et mesurées à l'aide d'un microscope binoculaire AmScope équipé d'une caméra numérique, couplée au logiciel d'analyse d'images (Winseedle, Regent Instruments Inc., Canada). Ce logiciel a permis de quantifier la surface totale des particules de charbon (en mm²) et le nombre de particules par échantillon.

Sur la base des modèles âge-profondeur, les données brutes ont été converties en taux d'accumulation de charbon de bois (CHAR, mm² cm⁻² an⁻¹) et les pics de feux ont été déduits du bruit de fond, en utilisant le logiciel CharAnalysis v.1.1 (Higuera, 2009). La fenêtre de

lissage pour l'estimation du bruit de fond, de la fréquence des incendies (FF) et des intervalles de retour des incendies a été ajustée pour chaque lacs d'étude afin de garantir que l'indice signal-bruit (SNI) était plus élevé mais aussi proche que possible de 3 (Brossier et al., 2014), ce qui indique la pertinence d'un enregistrement de charbon pour l'analyse de détection de pic. Pour chaque site, la fréquence des incendies a été compilée sur chaque site en utilisant une procédure d'estimation de la densité par noyau basée sur une bande passante de lissage de 500 ans, à l'aide du package « paleofire » dans l'environnement R. La quantité de biomasse brûlée (BB) au cours du temps a été reconstruite en mesurant la surface cumulée des particules de charbon par cm^3 pour chaque sous-échantillon. Puis, un indice de taille/sévérité des feux a été calculé à partir du ratio entre BB et FF (Ali et al., 2012). Ainsi, des valeurs élevées de l'indice de taille de feu correspondent à des périodes où la zone d'étude a connu des incendies de forêt plus grands/sévères que quand l'indice diminue (Ali et al., 2012).

8. Analyses numériques

Afin d'identifier les relations entre feux de forêt, climat et végétation au cours de la période d'étude, les données de feu et de température ont tout d'abord été interpolées à la même résolution temporelle que les données de végétation. Ensuite, les variations des assemblages polliniques observées sur les deux carottes sédimentaires ont été synthétisées, pour chaque site, à l'aide d'une analyse en composantes principales (ACP) réalisée sur les abondances polliniques transformées par Hellinger. Les variables environnementales (températures estivales, fréquence et taille des incendies et âge) ont ensuite été projetées sur les axes de l'ordination. L'ACP a été réalisée à l'aide du package ggvegan (v. 2.6-4 ; Oksanen, 2015). Afin de compléter ces analyses et comme les données n'étaient pas normalement distribuées, des corrélations de Spearman entre les taxons principaux, la température et les variables de feu ont été effectuées.

V. Résultats

1. Histoire des feux sous l'influence de la variabilité climatique rapide

L'Anomalie Climatique Médiévale

D'après la figure 13, la période de l'ACM dans l'est du Québec est comprise entre 1 050 et 700 cal. yrs BP. Cette phase chaude se caractérise par des fluctuations de températures, principalement par une hausse de 14,6 °C à un maximum de 16,1 °C. Au total, cette phase enregistre une augmentation des températures d'environ 1,5°C comparé à la période précédente. Durant cette phase de réchauffement, la quantité de biomasse brûlée autour du lac Rosette demeure faible, avec des valeurs de BB comprises entre 0,02 et 0 mm²/cm²/an. Au total, ce lac est marqué par 9 pics de feu significatifs, entre 4 200 et 0 cal. yrs BP, avec un intervalle de temps entre deux incendies de 300 ans, de 4 200 à 1 000 cal. yrs BP (Figure 11). Un premier incendie significatif est identifié à 1 000 cal. yrs BP (Figure 11), associé à une biomasse brûlée de 0,01 mm²/cm²/an. Sur l'ensemble de l'ACM, la taille de feu (FS) du lac Rosette montre une augmentation progressive, passant d'environ -0,2 à 1,2. Pour le lac 6, l'indice FS présente au contraire une diminution marquée, atteignant -0,2 entre 1 050 et 950 cal. yrs BP. Parallèlement, la biomasse brûlée présente une fluctuation faible tout au long de l'ACM, avec un premier feu significatif à 990 cal. yrs BP, et marqué par une quantité de biomasse brûlée de 0,03 mm²/cm²/an. Dans l'ensemble, le lac 6 est caractérisé par 11 événements de feux significatifs entre 1 400 cal. yrs BP et aujourd'hui. De 1 750 à 600 cal. yrs BP, l'intervalle de retour de feu était de 160 ans (Figure 12).

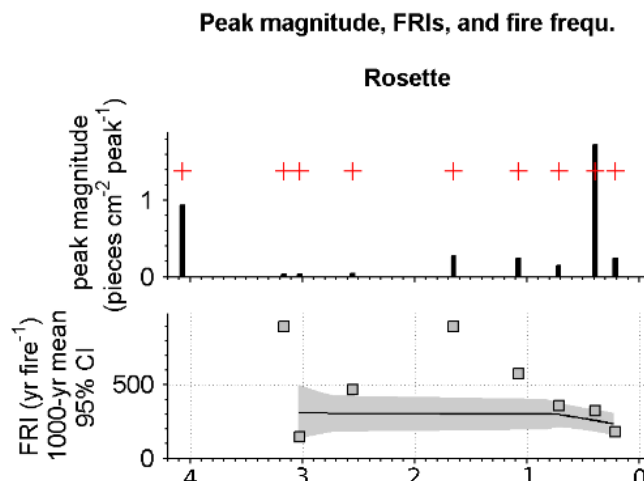


Figure 11: Sorties du logiciel CharAnalysis, représentant en haut les pics de feux significatifs (croix rouges) et la magnitude des pics de charbons, et en bas les intervalles de retour du feu du lac Rosette.

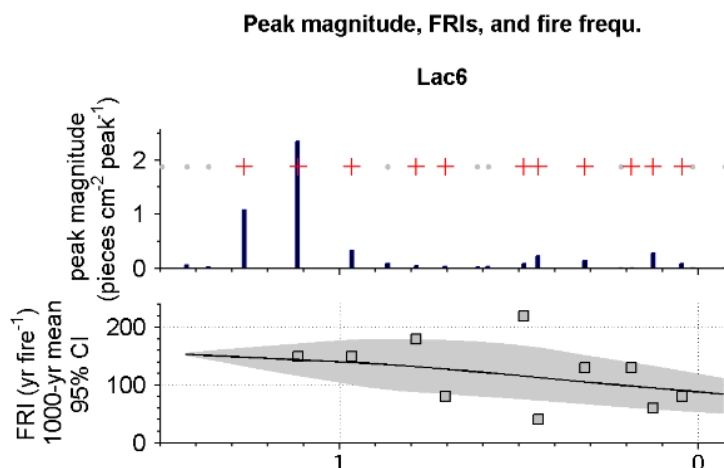


Figure 12: Sorties du logiciel CharAnalysis, représentant en haut les pics de feux significatifs (croix rouges) et la magnitude des pics de charbons, et en bas les intervalles de retour du feu du lac 6.

Petit Âge Glaciaire

À partir de 750 cal. yr BP, la transition vers le PAG se traduit par un refroidissement rapide des températures de 2,2 °C en 120 ans. Durant cette phase, l'indice BB du lac Rosette présente des fluctuations plus prononcées, atteignant un maximum de 0,04 mm²/cm²/an, période durant laquelle un deuxième incendie significatif est détecté à 700 cal. yrs BP. Simultanément, la fréquence des incendies au lac Rosette augmente progressivement sur l'ensemble du PAG, atteignant 2 feux par millénaire. Pour le lac 6, cette phase de

refroidissement est marquée par deux feux significatifs. Le premier, à 780 cal. yr BP est associé à une biomasse brûlée de $0,01 \text{ mm}^2/\text{cm}^2/\text{an}$, tandis que le second, à 700 cal. yrs BP, atteint $0,04 \text{ mm}^2/\text{cm}^2/\text{an}$. L'intervalle moyen entre ces incendies est de 125 ans (Figure 12). De plus, la fréquence de feu au début du PAG est de 5,5 feux par millénaire, puis se maintient jusqu'à environ 770 cal. yrs BP, avant d'augmenter pour atteindre 8,5 feux par millénaire à 550 cal. yr BP. L'indice FS montre de faibles fluctuations jusqu'à environ 650 cal. yrs BP, avant de décroître de nouveau pour atteindre -0,2. Cette période est ensuite suivie d'un léger réchauffement de $1,1^\circ\text{C}$, vers 590 cal. yrs BP, puis se termine par une baisse supplémentaire de $0,3^\circ\text{C}$ en 40 ans (Figure 13).

Entre 550 et 150 cal. yrs BP, le PAG est caractérisé par une diminution des températures, avec une baisse d'environ $1,5^\circ\text{C}$. Cette tendance s'accompagne, au lac Rosette, d'une augmentation de l'indice FS, qui atteint un maximum de 1,7 vers 350 cal. yrs BP. Au lac 6, l'indice FS reste plus stable, oscillant entre -0,2 et 0 sur l'ensemble de la période du PAG. Le lac Rosette enregistre deux feux significatifs, le premier à 380 cal. yrs BP présente une accumulation maximale de la biomasse brûlée de $0,09 \text{ mm}^2/\text{cm}^2/\text{an}$. Le second à 200 cal. yrs BP, atteint $0,07 \text{ mm}^2/\text{cm}^2/\text{an}$. Sur les mêmes périodes, deux pics de l'indice BB sont détectables (Figure 11 et 13). Au niveau du lac 6, quatre incendies sont observés durant cette phase, avec un intervalle moyen de 97 ans. Le premier, à 480 cal. yrs BP, présente une quantité de BB de $0,02 \text{ mm}^2/\text{cm}^2/\text{an}$, alors que le second atteint $0,04 \text{ mm}^2/\text{cm}^2/\text{an}$ à 450 cal. yrs BP. Enfin, deux feux rapprochés, à 200 et 190 cal. yrs BP, affichent respectivement 0,01 et 0 $\text{mm}^2/\text{cm}^2/\text{an}$ d'accumulation (Figure 12 et 13). D'après la reconstitution des incendies sur 2 000 ans dans la région de Sept-Îles de Wilke, (2024), il a pu être mis en évidence plusieurs pics de feux autour du XVI^{ème} siècle (449-350 cal. yrs BP) avec 3 incendies majeurs recensés. En termes de fréquence de feu, le lac Rosette enregistre son maximum entre 400 et 190 cal. yrs BP, avec 5,5 feux par millénaire. Le lac 6 montre également une augmentation marquée, culminant à 9,5 feux par millénaire vers 250 cal. yrs BP (Figure 13).

Entre 150 et 100 cal. yrs BP, les données de chironomes utilisées dans cette étude ne montrent pas un réchauffement significatif. Toutefois, le réchauffement marquant la transition du PAG vers la période postindustrielle est démontré à l'aide de la littérature scientifique, dans la partie état de l'art. Au niveau du lac Rosette, l'indice FS diminue progressivement pour atteindre 1 vers 100 cal. yrs BP. Aucun incendie significatif n'est enregistré durant cette phase, et la biomasse brûlée se maintient entre $0,02$ et $0,04 \text{ mm}^2/\text{cm}^2/\text{an}$ entre 150 et 100 cal. yrs BP.

Au lac 6, l'indice FS reste globalement stable. Un seul incendie significatif est observé à 120 cal. yrs BP, avec une accumulation de biomasse brûlée de $0,04 \text{ mm}^2/\text{cm}^2/\text{an}$. À la fin du PAG, l'indice BB du lac 6 décroît jusqu'à $0 \text{ mm}^2/\text{cm}^2/\text{an}$. Concernant la fréquence de feu, le lac Rosette présente une diminution à partir de 150 cal. yrs BP, atteignant 4,9 feux par millénaire. Le lac 6 enregistre également une légère baisse à partir de 190 cal. yrs BP, pour atteindre 9 feux par millénaire vers 100 cal. yrs BP. Selon Wilke (2024), la fréquence des feux autour de la région de Sept-Îles croît entre le XVIII^{ème} (249-150 cal. yrs BP) et le XIX^{ème} (149-50 cal. yrs BP) siècles.

Période postindustrielle

Durant cette période, les températures varient entre $14,8^\circ\text{C}$ et 13°C , pour atteindre environ $13,3^\circ\text{C}$ vers 74 ans cal BP. L'amplitude de cette variation demeure toutefois non significative. Cependant, comme mentionné précédemment, la littérature scientifique confirme l'existence de ce réchauffement. Cette dynamique s'accompagne, au lac Rosette, d'une diminution continue de l'indice FS, passant de 1 à -0,2 entre 100 et -74 cal. yrs BP. Aucun incendie significatif n'est enregistré sur cet intervalle (Figure 11). Parallèlement, la biomasse brûlée diminue à partir de 100 cal. yrs BP pour atteindre un minimum de $0 \text{ mm}^2/\text{cm}^2/\text{an}$ vers 50 cal. yr BP. Après cette date, l'indice BB augmente progressivement jusqu'à aujourd'hui, atteignant $0,04 \text{ mm}^2/\text{cm}^2/\text{an}$. La fréquence de feu, quant à elle, diminue de 4,9 à 4 feux par millénaire à partir de 100 cal. yrs BP, puis se maintient à ce niveau jusqu'à l'époque actuelle (Figure 13).

Au lac 6, l'indice FS diminue de manière continue entre 100 et -74 cal. yrs BP. Un feu significatif est détecté vers 50 cal. yrs BP, associé à une accumulation de biomasse brûlée de $0,042 \text{ mm}^2/\text{cm}^2/\text{an}$ (Figure 12). Suite à cet événement, l'indice BB décline jusqu'à aujourd'hui, ainsi que la fréquence des feux qui diminue progressivement pour atteindre 7,5 feux par millénaire vers -50 cal. yrs BP, puis se stabilise (Figure 13). En parallèle à ces données, Wilke (2024) a montré que la fréquence de feu diminue dans la région de Sept-Îles durant le XX^{ème} siècle, de manière à ce qu'elle soit moins élevée qu'entre le XVIII^{ème} et le XIX^{ème} siècles, avec seulement un événement de feu recensé autour du lac 6 en 1976 (1 140,2 ha). De plus, le 21^{ème} siècle n'est marqué par aucune preuve de feu, malgré des événements connus, tels que le plus récent en 2023, avec des incendies allant de 14 950 ha à 2 362,1 ha, autour du lac 6 (Wilke, 2024; Gouvernement du Québec, 2025).

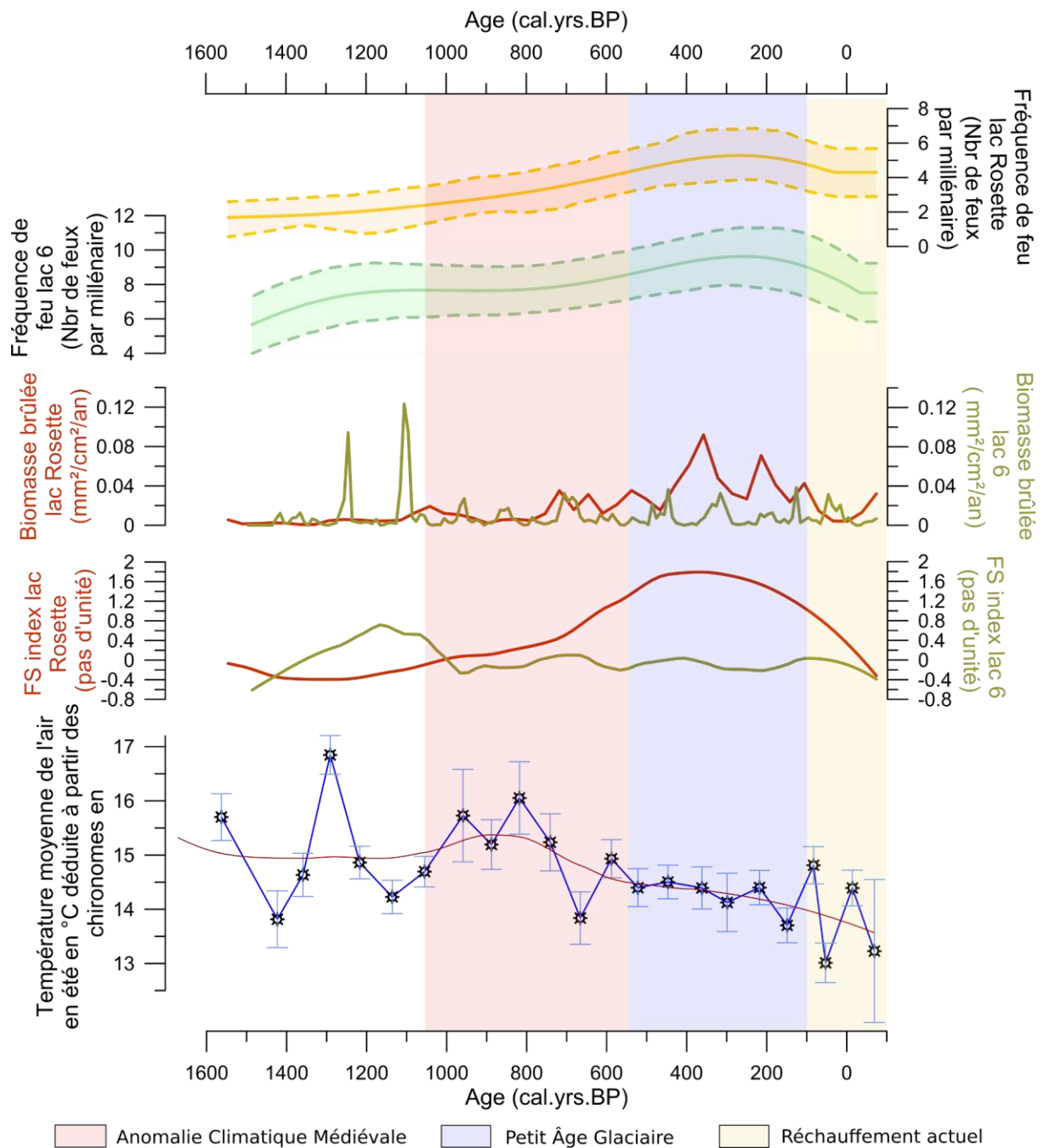


Figure 13: Graphique des régimes de feu et variabilité climatique durant l'Holocène. A. Température moyenne de l'air en été en °C déduite à partir des chironomes; B. Taille de feux (FS index); C. Biomasse brûlée (BB); D. Fréquence de feu (FF) du lac 6; E. Fréquence de feu (FF) du lac Rosette

2. Trajectoire de la végétation face aux fluctuations climatiques

A. Lac Rosette

À l'échelle séculaire, l'évolution de la végétation du lac Rosette se divise en trois zones principales. La zone 3 se caractérise par une dominance de l'épinette noire, tandis que le bouleau, le sapin baumier et le pin gris sont plus rares. La zone 2 présente une augmentation de l'abondance de l'épinette noire et du sapin baumier, globalement opposée à celle du bouleau. L'aulne rugueux y montre une variabilité marquée et une tendance à l'augmentation, tandis que l'aulne crispé reste plus stable. Le pin blanc demeure relativement constant, alors que les herbacées et les éricacées y sont faiblement représentées. Enfin, la zone 1, plus courte, se distingue par une diminution de l'épinette noire et de l'aulne crispé, parallèlement à une augmentation du bouleau, du pin blanc, du mélèze laricin, de l'aulne rugueux et des herbacées (Figure 14).

L'Anomalie Climatique Médiévale

Cette phase de réchauffement (+1,5 °C) se traduit par une nette augmentation de l'épinette noire au début de l'ACM, à un maximum de 51 % vers 950 cal. yrs BP, avant une chute rapide à 40 % vers 790 cal. yrs BP. Le sapin baumier atteint son pic (8 %) vers 940 cal. yrs BP, puis se stabilise entre 5-6 % jusqu'à 800 cal. yrs BP. À l'inverse, le pin gris diminue fortement, passant de 7 % à 2,5 % après 940 cal. yrs BP. Les autres taxons (mélèze laricin, pruche du Canada) restent marginaux, autour de 1 % (Figure 14).

Chez les feuillus, le bouleau reste dominant, avec une abondance comprise entre 35 et 39 % jusqu'à 940 cal. yrs BP, puis décroît rapidement à ~29 % vers 860 cal. yrs BP. Le chêne diminue également, passant de 2 % au début de l'ACM à moins de 1 % après 1 000 cal. yrs BP et se stabilise jusqu'à 800 cal. yrs BP. Les autres feuillus, ainsi que les herbacées et éricacées, demeurent marginaux (<1 %). Enfin, chez les arbustes, l'aulne rugueux varie entre 4,5% et 2,5%, tandis que l'aulne crispé fluctue entre 3,9% et 2% (Figure 14).

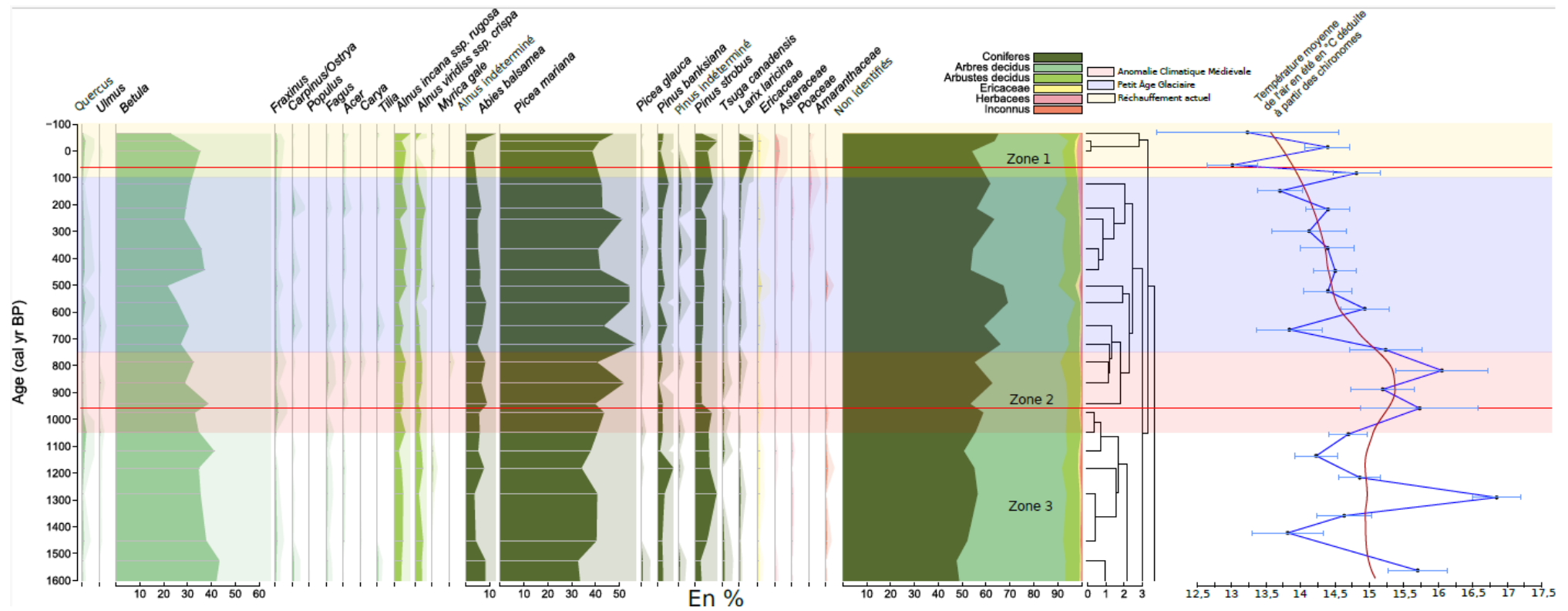


Figure 14: Diagramme pollinique pour le lac Rosette sur 1 600 cal. yrs BP, selon la température estivale de l'air déduite à partir de chironomes, avec un lissage loess en rouge (pente= 0,25).

Petit Âge Glaciaire

Phase de refroidissement de 750 à 150 cal. yrs BP

La première phase du PAG (-1,8 °C) est marquée par une forte augmentation de l'épinette noire, de 32 % à 60 % entre 790 et 710 cal. yrs BP, suivie d'une baisse à ~53% jusqu'en 500 cal. yrs BP, puis elle chute à 50 % vers 250 cal. yrs BP. En 90 ans, le sapin baumier diminue de 8 % à 5 % puis se stabilise autour de 8 %. Le pin gris et le pin blanc présentent des pics vers 500 cal. yrs BP (~4-5 %), un déclin autour de 2 %, puis une remontée à ~5 % en fin de période (Figure 14).

Chez les feuillus, le bouleau domine d'abord avec deux pics (32 % vers 790 cal. yrs BP et 30 % vers 650 cal. yrs BP), puis chute à 22 % vers 500 cal. yrs BP, remonte à 37 % vers 450 cal. yrs BP, avant d'atteindre un minimum de 20 % vers 250 cal. yrs BP et de croître légèrement par la suite. Le chêne apparaît vers 600 cal. yrs BP, se maintient entre 1-2 % jusqu'à 230 cal. yrs BP, puis disparaît. Parmi les arbustes, l'aulne rugueux fluctue fortement, avec des pics notables de 6 % vers 650, 500, 340 et 230 cal. yrs BP, avant une diminution progressive. L'aulne crispé décline de 4 % à 1 % entre 790 et 650 cal. yrs BP, puis connaît deux maxima (2 % vers 450 cal. yrs BP et 6 % vers 230 cal. yrs BP), suivis d'un déclin. Les éricacées et les herbacées (astéracées, amaranthacées) demeurent marginales avec des valeurs comprises entre 1 et <1 % (Figure 14).

Phase de réchauffement de 150 à 100 cal. yrs BP

Durant les cinquante dernières années du PAG, l'épinette noire décroît de 44 % (130 cal. yrs BP) à ~41 % en fin de période. Le sapin baumier suit une tendance similaire, tombant à 4 %. Le pin blanc et le pin gris atteignent un maximum de 8 % et 4 % vers 130 cal. yrs BP, puis déclinent progressivement. Enfin, le mélèze laricin augmente légèrement pour atteindre 1,5 % d'abondance (Figure 14).

Chez les feuillus, le bouleau progresse pour atteindre 31 % en fin de PAG, tandis que les autres espèces sont absentes ou marginales (<1 %). L'aulne rugueux décroît jusqu'à 3 % vers 130 cal. yrs BP, puis remonte légèrement. Les amaranthacées présentent un pic à ~2 % vers 130 cal. yrs BP, alors que les éricacées disparaissent (Figure 14).

Période postindustrielle

Bien qu'il ne soit pas visible sur les données chironomes, le réchauffement durant cette période postindustrielle est bien présent. L'épinette noire diminue jusqu'à 38 % vers 0 cal. yrs BP, puis remonte à 47 % vers -74 cal. yrs BP. Le sapin baumier suit la même dynamique, passant de 3 % à 10 % sur la même période. Le pin blanc décroît à 5 % vers 0 cal. yrs BP, puis remonte à 9 % vers -40 cal. yrs BP avant de baisser de nouveau, tandis que le pin gris reste faible (<1 %). Le mélèze laricin croît jusqu'à 5 % entre 0 et -40 cal. yrs BP, puis régresse. L'épinette blanche est absente (Figure 14).

Chez les feuillus, le bouleau atteint un maximum de 36 % vers 0 cal. yrs BP, puis décline progressivement jusqu'à 23 % aujourd'hui. Le chêne reste marginal (~1 %). Le frêne et les autres feuillus demeurent absents ou <1 %. Parmi les arbustes, l'aulne rugueux varie fortement, avec un maximum de 7 % vers -74 cal. yrs BP, tandis que l'aulne crispé, quasi absent au début, réapparaît vers -40 cal. yrs BP et progresse jusqu'à ~1,5 % actuellement. Chez les herbacées, seules les astéracées se maintiennent à environ 2 %. Les éricacées quant à elles se stabilisent à 1% Figure 14).

B . Lac 6

L'évolution de la végétation du lac 6 se divise en quatre zones significatives. La zone 4 se caractérise par la dominance de l'épinette noire, du sapin baumier, de l'aulne rugueux et de l'aulne crispé, accompagnée d'une présence plus limitée du pin blanc. Les hausses de l'épinette noire, du sapin baumier et du pin blanc sont synchrones aux diminutions du bouleau, de l'aulne rugueux et de l'aulne crispé. Cette dynamique se remarque dans les autres zones, bien que sur des échelles temporelles plus courtes (Figure 15).

Anomalie Climatique Médiévale

Durant la première phase de réchauffement de l'ACM (+1 °C), l'épinette noire atteint un maximum de 53 % vers 1 020 cal. yrs BP, chute à 39 % vers 910 cal. yrs BP, puis remonte à 43 % vers 810 cal. yrs BP. Le sapin baumier présente une évolution similaire, passant de 10 % (960 cal. yrs BP) à 6 % (850 cal. yrs BP), avant de retrouver 10 % à 810 cal. yrs BP. Le pin blanc connaît deux pics modestes (2–3 %), respectivement vers 1 020 et 910 cal. yrs BP, avant de retomber <1 %. Le pin gris reste faible (<1 %) et décline de 850 cal. yrs BP jusqu'à la fin

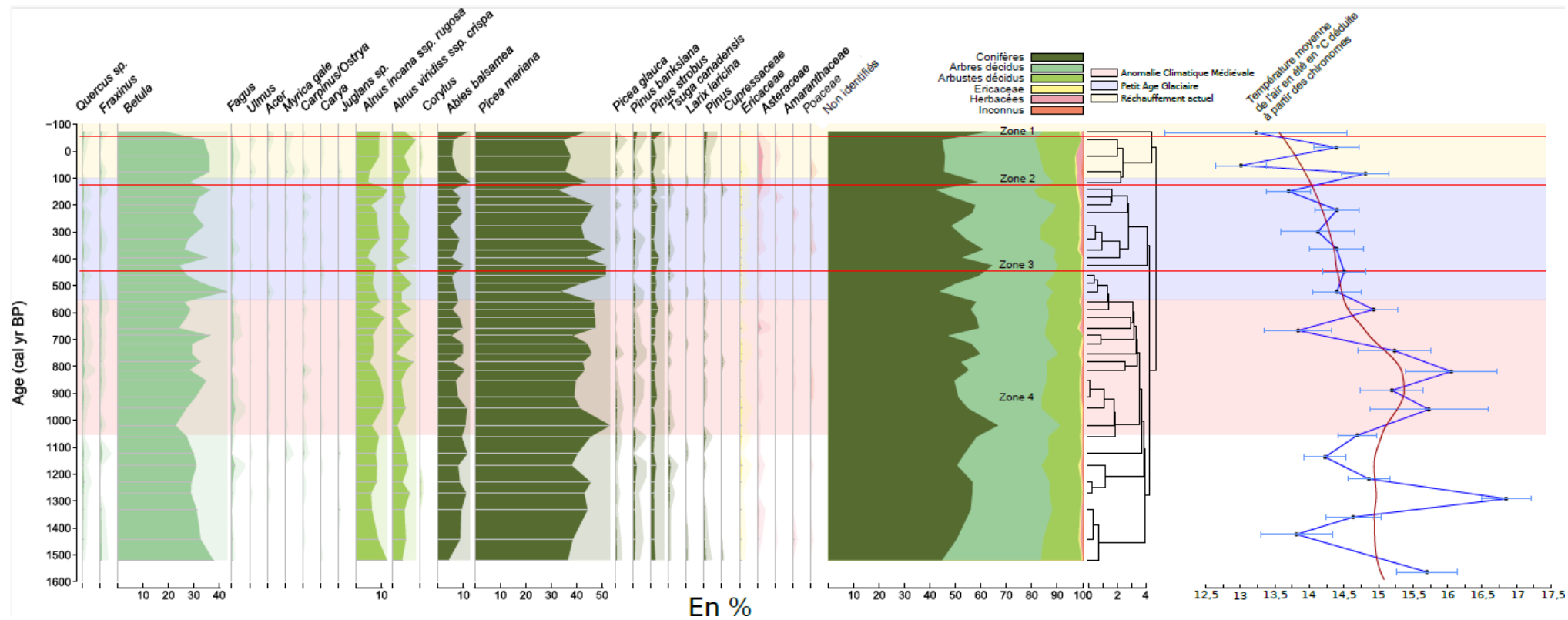


Figure 15: Diagramme pollinique pour le lac 6 sur 1 600 cal. yrs BP, selon la température de l'air estival déduite à partir de chironomes et avec un lissage loess en rouge (pente= 0,25).

de l'ACM, tandis que l'épinette blanche, la pruche du Canada et le mélèze laricin demeurent absents ou marginaux (<1 %) (Figure 15).

Chez les feuillus, le bouleau domine, passant de 24 % vers 1 020 cal. yrs BP à un maximum de 34 % vers 850 cal. yrs BP, puis diminuant légèrement (~28 %) vers 810 cal. yrs BP. Le chêne reste secondaire avec deux pics (3 % vers 910 et 2 % vers 810 cal. yrs BP), tandis que l'hêtre atteint 2 % vers 960 cal. yrs BP avant de décliner. Les autres feuillus demeurent marginaux (<1 %). Parmi les arbustes, l'aulne rugueux varie entre 5 % et 10 % de 750 à 620 cal. yrs BP, avec un maximum de 8% à la fin de l'ACM. L'aulne crispé atteint un pic marqué de 10 % vers 680 cal. yrs BP, avant de décroître et de se stabiliser autour de 3-4 % après 550 cal. yrs BP. Chez les herbacées, seules les astéracées montrent un maximum notable de 2 % vers 660 cal. yrs BP. Les éricacées sont présentes à hauteur de 1 % vers 770 cal. yrs BP, autrement elles restent relativement faibles (<1 %) (Figure 15).

Petite Âge Glaciaire

Phase de refroidissement de 750 à 150 cal. yrs BP

Avec le refroidissement (-1,8 °C), l'épinette noire reste dominante, elle chute à 34 % vers 520 cal. yrs BP, atteint un maximum de 51 % vers 460 cal. yrs BP, puis fluctue entre 42–51 % avant de retomber à 34 % vers 150 cal. yrs BP. Le sapin baumier enregistre un maximum de 10 % vers 420 cal. yrs BP, suivi de plusieurs pics secondaires (9 % vers 230 cal. yrs BP) avant de décliner à 5 %. Le pin blanc atteint 4 % vers 390 cal. yrs BP, chute à 1 % vers 320 cal. yrs BP, puis remonte à 3 % vers 200 cal. yrs BP, avant de disparaître presque totalement et de se maintenir à ~1,5 %. Le pin gris ne dépasse pas 1 %, et l'épinette blanche, la pruche du Canada et le mélèze laricin restent marginaux (<1 %) (Figure 15).

Durant cette phase de refroidissement, le bouleau reste l'essence dominante avec des fluctuations marquées, il passe de 24 % vers 420 cal. yrs BP à un maximum de 37 % vers 390 cal. yrs BP, puis oscille entre 26 et 35 % de 360 à 320 cal. yrs BP, avant d'augmenter progressivement jusqu'à 35 % en fin de période. Le chêne demeure très rare (<1 %), tout comme les autres feuillus. Chez les arbustes, l'aulne rugueux connaît plusieurs phases d'expansion, culminant à 11 % en fin de séquence, tandis que l'aulne crispé varie entre 1,5 % et 6 % de 420 à 390 cal. yrs BP, avec une remontée finale à 5 %. Les éricacées restent stables autour de 1 %, et les herbacées (poacées, amaranthacées, astéracées) ne dépassent pas 1 %, malgré une légère hausse des astéracées en fin de période (Figure 15).

Phase de réchauffement de 150 à 100 cal. yrs BP

Lors de la seconde phase du PAG (+1,2 °C), l'épinette noire chute à 32 % vers 140 cal. yrs BP, remonte à 43 % vers 120 cal. yrs BP, puis décline fortement jusqu'à 4 % en fin de période. Le sapin baumier suit une tendance similaire, passant de 5 % (150 cal. yrs BP) à 11 % (120 cal. yrs BP), avant de régresser à 1 % vers 100 cal. yrs BP. Le pin blanc atteint un maximum limité de 2 % vers 140 cal. yrs BP, puis diminue jusqu'à 1 %. Les autres conifères demeurent marginaux (<1 %) (Figure 15).

Chez les feuillus, le bouleau domine avec un maximum de 35 % vers 140 cal. yrs BP, puis diminue à ~29 % vers 120 cal. yrs BP. Les autres feuillus restent marginaux (<1 %). Parmi les arbustes, l'aulne rugueux atteint 11 % vers 140 cal. yrs BP, puis décroît à 5 % et se stabilise, tandis que l'aulne crispé progresse légèrement jusqu'à 5 % en fin de période. Les éricacées culminent à 1 % vers 140 cal. yrs BP avant de décliner. Les herbacées sont très rares, seules les astéracées atteignent 2 % vers 120 cal. yrs BP (Figure 15).

Période postindustrielle

Durant cette phase de réchauffement, l'épinette noire fluctue fortement, elle chute à 34 % vers 80 cal. yrs BP, remonte à 38 % vers 10 cal. yrs BP, puis décline à 4 % vers -50 cal. yrs BP avant de culminer à 43 % vers -74 cal. yrs BP. Le sapin baumier passe de 5 % (entre 100 et -50 cal. yrs BP) à 11 % vers -74 cal. yrs BP. Le pin blanc progresse de <1 % (-50 cal. yrs BP) à 3 % en fin de séquence, tandis que le pin gris augmente de 1 % vers 80 cal. yrs BP à 2 % vers -74 cal. yrs BP. Les autres conifères restent marginaux ou absents (<1 %) (Figure 15).

Chez les feuillus, le bouleau domine avec ~36 % jusqu'à 10 cal. yrs BP, avant de chuter à 19 % vers -74 cal. yrs BP. Le chêne apparaît tardivement (1 % à -74 cal. yrs BP), tandis que le frêne et le piment royal présentent deux occurrences ponctuelles à 1 % (80 et -74 cal. yrs BP). Les autres feuillus restent marginaux (<1 %). Du côté des arbustes, l'aulne rugueux progresse jusqu'à 9 % dès 10 cal. yrs BP et se stabilise à ce niveau, alors que l'aulne crispé fluctue entre 7 % (80 cal. yrs BP), 9 % (-50 cal. yrs BP) et 4 % (-74 cal. yrs BP). Les éricacées connaissent deux occurrences discontinues (1 % vers 80 et -74 cal. yrs BP). Les herbacées sont peu représentées : amaranthacées <1 %, poacées absentes, et astéracées limitées à un maximum de 2 % vers 10 cal. yrs BP avant leur disparition en -74 cal. yrs BP (Figure 15).

3. Relations climat-feu-végétation entre les deux sites d'étude

A. Lac Rosette

L'ACP du lac Rosette met en évidence que l'axe 1 de la ACP (PCA1) explique 25% de la variance des données. L'axe 2 de la ACP (PCA2) explique quant à lui 15,6% de la variance des données. Les scores des échantillons suivent majoritairement la PCA2 au cours du temps, avec des échantillons associés à des scores de PCA2 positifs jusqu'à 942 cal. yrs BP, puis négatifs entre *ca.* 865 et 254 cal. yrs BP. Jusqu'à 942 cal. yrs BP, les assemblages sont marqués par la dominance du bouleau, qui corrèle fortement avec les valeurs positives de la PCA2, avec également le pin gris et le pin blanc. Cette végétation est associée à une corrélation négative avec la biomasse brûlée, la fréquence de feu et la taille de feu. Seul le pin gris est corrélé positivement ($\rho = 0,12$) à une biomasse brûlée élevée (Figure 17). Puis, les assemblages évoluent vers les valeurs négatives de la PCA2 entre *ca.* 865 et 254 cal. yrs BP (Figure 16). Ceux-ci sont caractérisés par des assemblages typiques de la pessière à mousses avec la large dominance de l'épinette noire, associée au sapin baumier et aux Amaranthaceae. La fréquence et la taille des feux, ainsi que la quantité de biomasse brûlée, corrélient positivement avec l'épinette noire et la PCA2. Ceci s'observe également avec les corrélations de Spearman (Figure 17), montrant une forte corrélation positive entre l'épinette noire et la fréquence de feu ($\rho = 0,55$), la biomasse brûlée ($\rho = 0,64$) et la taille de feu ($\rho = 0,52$). Les corrélations de Spearman ajoutent une précision aux résultats de l'ACP et montrent que seule l'épinette noire présente une corrélation négative avec de nombreuses autres espèces représentées dans l'ACP, telle que le bouleau, le sapin baumier, le pin gris, le pin blanc, l'aulne rugueux, l'aulne crispé, l'aulne rugueux, les astéracées, les poacées et les éricacées.

Enfin, la température est corrélée négativement à tous les paramètres abiotiques, dont la fréquence de feu ($\rho = -0,64$), la biomasse brûlée ($\rho = -0,39$) et la taille de feu ($\rho = -0,32$). Toutefois, ces mêmes facteurs présentent une corrélation positive entre eux, allant de 0,8 entre la biomasse brûlée et la fréquence de feu et de 0,76 avec la taille de feu. Ceci indique que plus la température est élevée, plus la fréquence de feu, la biomasse brûlée et la taille de feu vont être faibles.

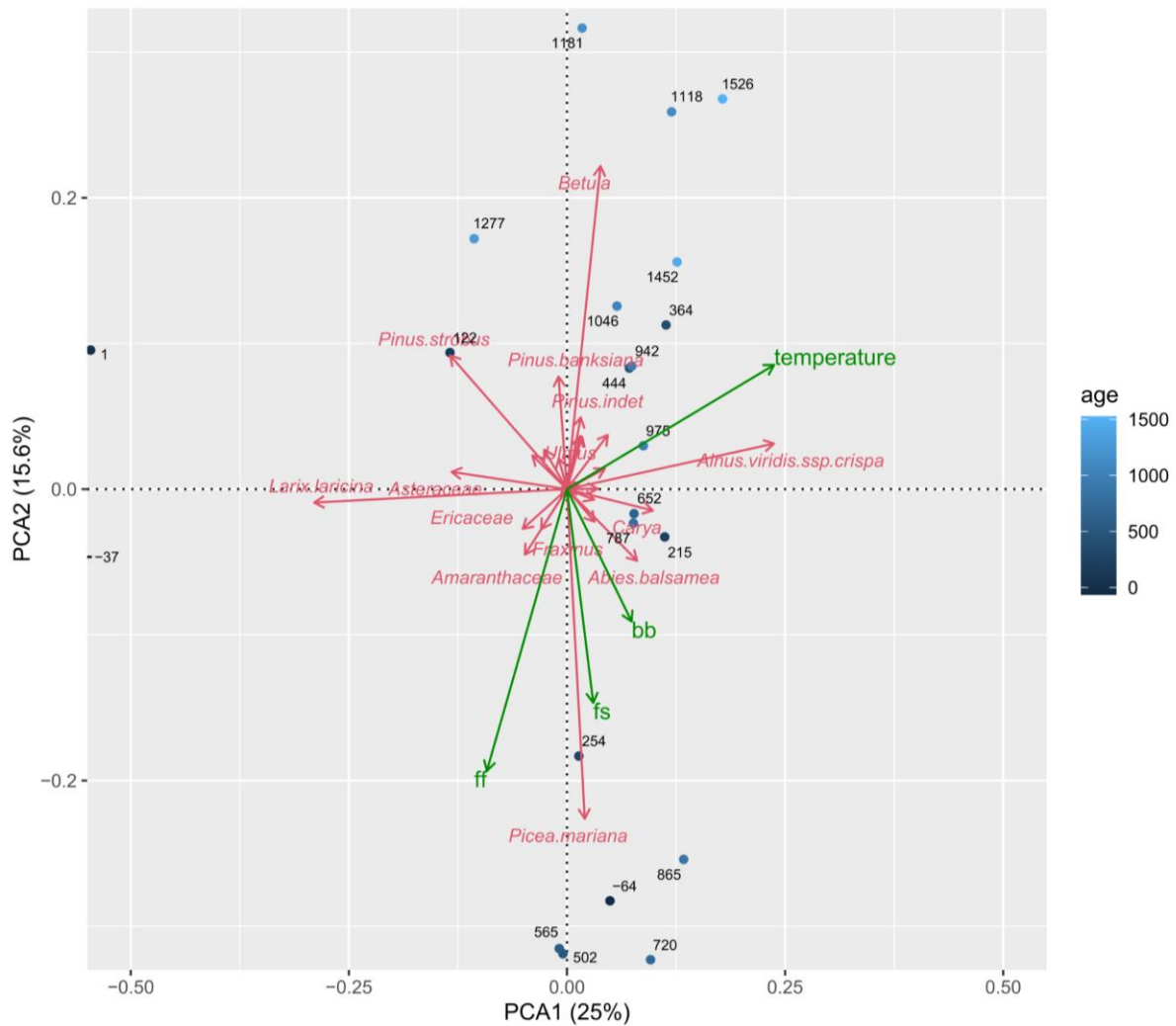


Figure 16: ACP représentant les relations entre les assemblages polliniques du lac Rosette et la température, la fréquence de feu (FF), biomasse brûlée (BB) et la taille de feu (FS) et l'âge. Seuls les taxons avec les scores d'ACP les plus élevés sont représentés pour faciliter les interprétations écologiques. Les trajectoires observées sont représentées en gradient de bleu.

Puis, sur la période récente (1 à -37 cal. yrs BP), les assemblages évoluent vers les valeurs négatives de la PCA1 (Figure 16). Ces assemblages sont marqués par une augmentation du mélèze laricin, des Asteracées, Ericacées et du pin blanc. À l'opposé, les valeurs positives de la PCA1 sont dominées par l'aulne crispé, corrélé négativement à la fréquence de feu ($\rho = -0,1$) (Figure 17).

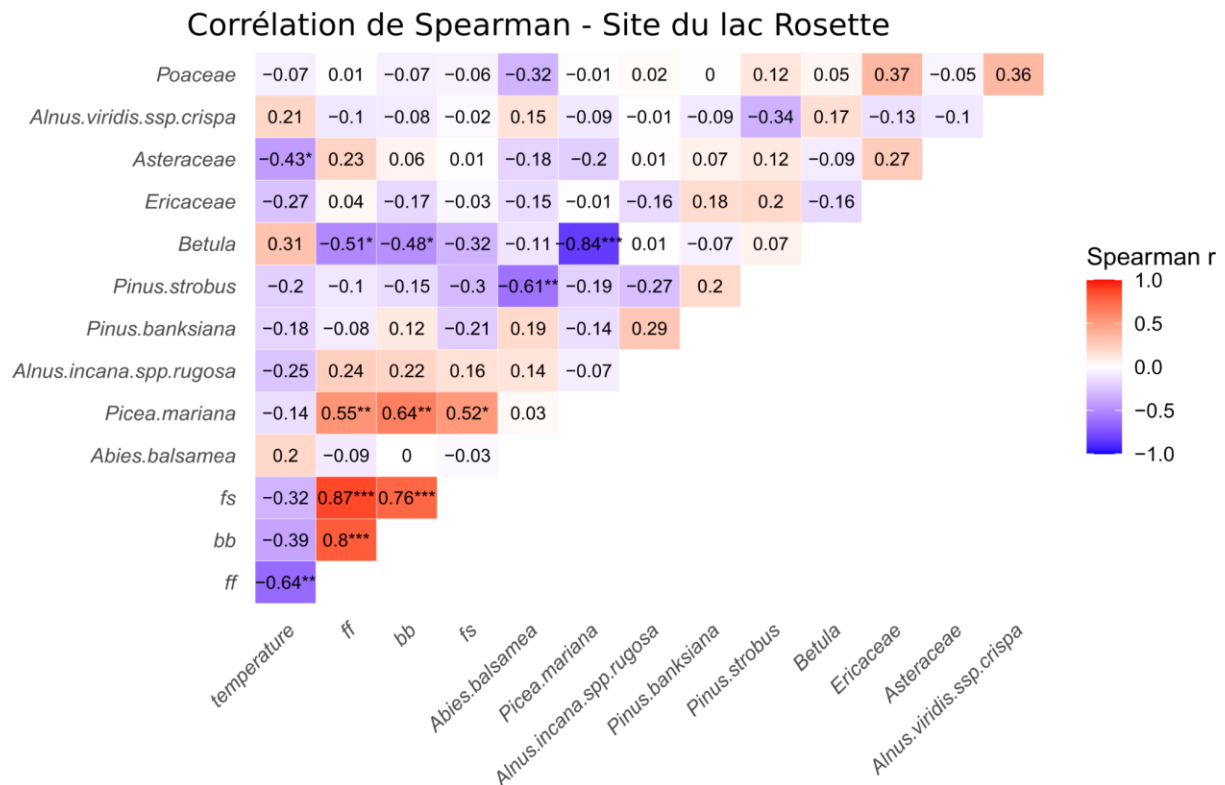


Figure 17: Corrélations de Spearman du lac Rosette entre les espèces végétales et la température, la fréquence de feu (FF), la biomasse brûlée (BB) et la taille de feu (FS).

B. Lac 6

Une structure temporelle moins claire est observable au Lac 6. La PCA1 explique 21,3% de la variance des données, tandis que l'axe des abscisses explique 11,3% de la variance des données. Comme au lac Rosette, une structuration opposée entre l'épinette noire et le bouleau est cependant observée. Le bouleau et l'aulne crispé s'expriment dans les valeurs positives de la PCA1, dans la période récente, autour de 277 à 42,5 cal. yrs BP, alors que l'épinette noire et le sapin baumier se retrouvent dans les valeurs négatives de la PCA1 et principalement entre 1229,7 à 200 cal. yrs BP ($\rho = -0,81$ et $-0,55$, respectivement l'épinette noire avec le bouleau et l'aulne crispé, Figures 18 et 19). La température et la fréquence de feu sont corrélés faiblement positivement à l'épinette noire ($\rho = 0,37$), de même que la taille de feu ($\rho = 0,17$). Ensuite, la corrélation positive entre la température et la taille de feu est de 0,25, à l'inverse de la fréquence de feu qui est fortement corrélée négativement à la température ($\rho = -0,67$) et à la taille de feu ($\rho = -0,25$), tandis de la biomasse brûlée est indépendante de la température, de la fréquence de feu et de la taille de feu (Figure 19). Ainsi, plus la température s'accroît, plus l'ampleur des feux tend à croître, tandis que leur fréquence diminue.

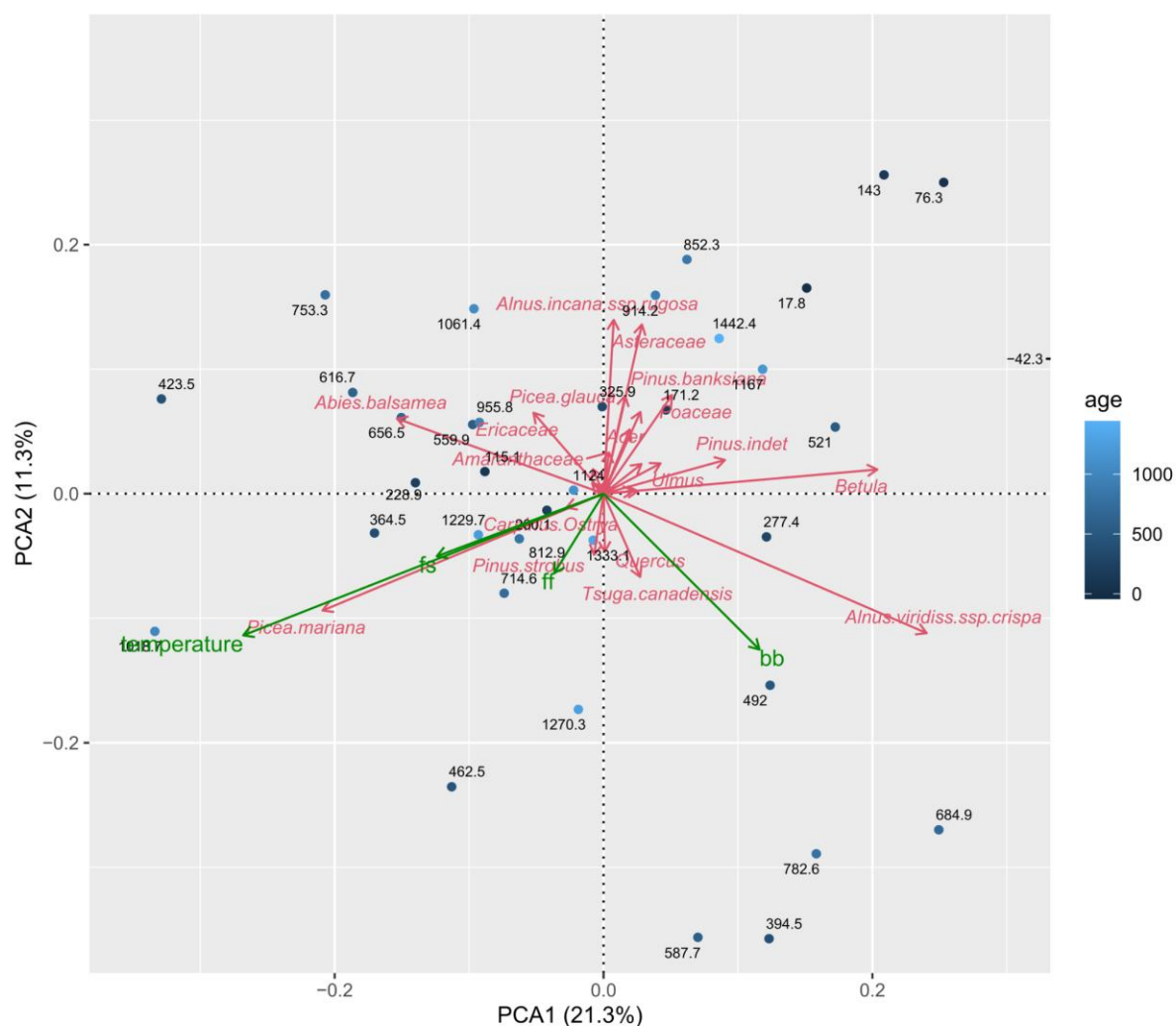


Figure 18: ACP représentant les relations entre les assemblages polliniques du lac 6 et la température, la fréquence de feu (FF), biomasse brûlée (BB) et la taille de feu (FS) et l'âge.

Seuls les taxons avec les scores d'ACP les plus élevés sont représentés pour faciliter les interprétations écologiques. Les trajectoires observées sont représentées en gradient de bleu.

Sur la période plus tardive (1333 à 587,7 cal. yrs BP), les assemblages se répartissent majoritairement dans les valeurs négatives de la PCA2. Ces assemblages sont marqués par une augmentation du la pruche du Canada, du chêne, du charme et du pin blanc. Tandis qu'au sein d'une période intermédiaire (325,9 à 76,3 cal. yrs BP) l'aulne rugueux, les astéracées, le pin gris, les poacées, les amaranthacées et l'érable dominant dans les valeurs positives de la PCA2. Enfin, les essences comme l'orme, le frêne, le hêtre, le mélèze laricin, le caryer et les éricacées ne sont pas bien représentées par l'ACP (Figure 18).

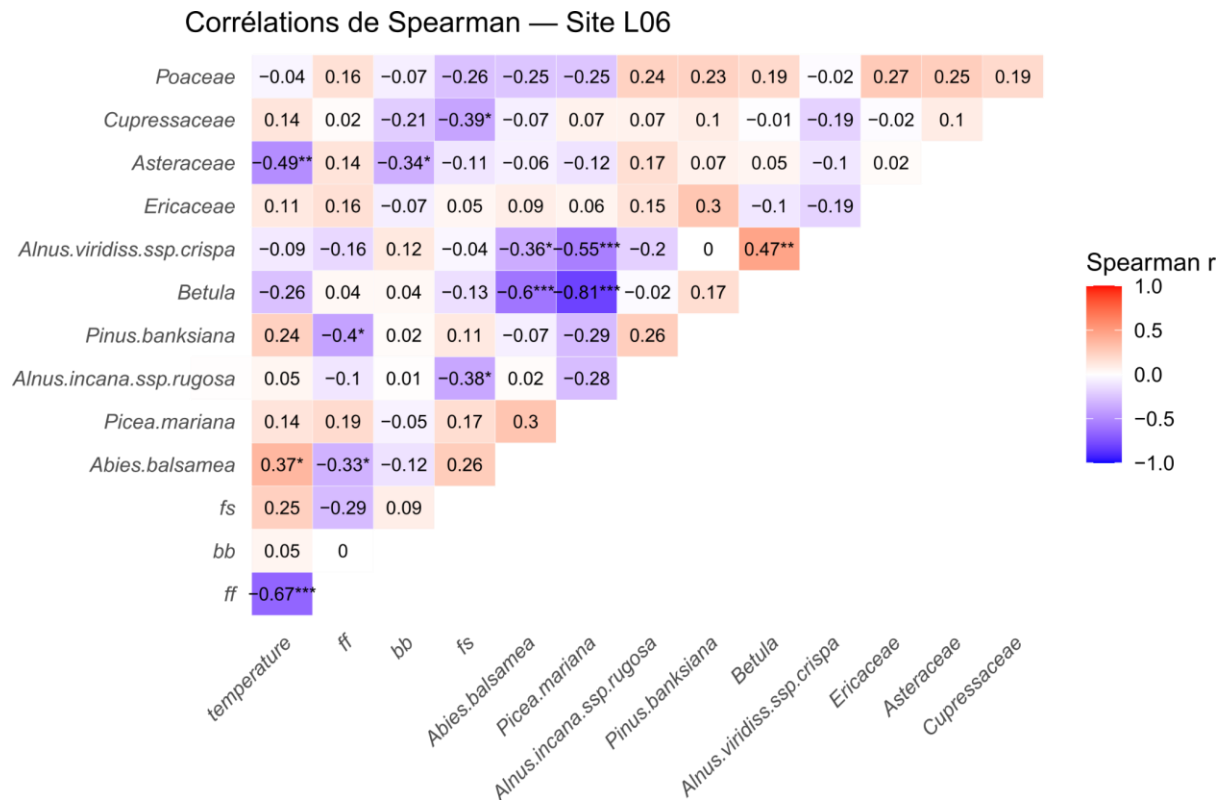


Figure 19: Corrélations de Spearman du lac 6 entre les espèces végétales et la température, la fréquence de feu (FF), la biomasse brûlée (BB) et la taille de feu (FS).

4. Mise en parallèle entre les deux lacs

Lorsqu'on met en relation les deux analyses, on observe que la répartition temporelle du lac 6 apparaît plus diffuse et moins nette que celle du lac Rosette, où l'on distingue clairement une végétation composée de mélèze laricin, des asteracées, d'éricacées, d'aulne crispé et de pin blanc dans le récent à une période plus ancienne caractérisée par la présence du bouleau, du pin gris, du pin blanc, de l'épinette noire, du sapin baumier et des Amaranthaceae. Le développement de l'épinette noire est freiné par une forte biomasse brûlée sur le lac 6, tandis qu'au lac Rosette, ce même facteur semble au contraire favoriser sa croissance. Toutefois, une tendance similaire est observée sur les deux lacs, lorsque l'épinette noire se développe, seul le sapin baumier abonde, les autres espèces sont peu représentées.

L'aulne rugueux semble favorisé par les trois variables de feux au niveau du lac Rosette, ce qui n'est pas le cas sur le lac 6, où celui-ci est corrélé négativement à la fréquence de feu et la taille de feu. Cette même dynamique est observée pour l'aulne crispé, qui est corrélé positivement à la biomasse brûlée sur le lac 6, à l'inverse du lac Rosette. Le bouleau et le sapin baumier sont tous deux corrélés négativement sur les deux lacs. Toutefois, sur le lac Rosette,

le sapin baumier est complètement indépendant des paramètres FF, BB et FS, ce qui n'est pas le cas sur le lac 6 pour la fréquence de feu et la biomasse brûlée.

VI. Discussion

1. Influence des facteurs abiotiques (température, gradient d'humidité, feux) sur la dynamique de végétation

A. Anomalie Climatique Médiévale

Durant cette période climatique, les taxons dominants sur les deux lacs confondus sont l'épinette noire et le bouleau, accompagnés d'espèces sous-dominantes telles que le sapin baumier et l'aulne rugueux. Les données de température démontrent que l'ACM correspond à la période la plus chaude du dernier millénaire, avec des températures en moyenne 1,5 °C plus chaudes que la période postérieure. Cependant, les feux ne se sont pas notablement intensifiés sur les deux lacs étudiés comparé à la période précédente. La biomasse brûlée est restée faible, tout comme la taille des incendies (Figure 13). Ce phénomène contre-intuitif (Marlon et al., 2017) a aussi été remarqué dans la région du Nouveau-Brunswick, qui suggèrent que les feux sont devenus moins sévères, plus petits, bien qu'avec une occurrence légèrement plus élevée que précédemment (Collins et al., in press). Cette absence d'augmentation significative de l'activité des incendies est reliée à une faible abondance de l'aulne crispé et des herbacées (Collins et al., in press), taxons pionniers indicateurs de perturbations et d'une végétation ouverte (Lesven, 2024). Comme le montrent nos diagrammes polliniques, l'aulne crispé et les herbacées restent relativement peu représentés par rapport au bouleau et à l'aulne rugueux. Lesven, (2024) confirme aussi qu'au sein de la pessière à mousse à l'est du Québec, cette période chaude, avec une fréquence de feu modérée, est marquée par une abondance élevée des taxons caducifoliés, tels que le bouleau et l'aulne rugueux. Similairement aux études de Collins et al., (in press) et Lesven, (2024), les températures plus élevées précédemment, au milieu du Néoglaciale, sont à l'origine d'une représentation plus réduite des conifères, en contraste avec une présence plus marquée des taxons feuillus tempérés dans nos diagrammes. Bien qu'il ne soit pas possible de le déterminer au niveau spécifique, celui-ci est probablement en majorité du bouleau jaune, espèce thermophile se développant en conditions plus tempérées sous des conditions de feu peu fréquentes (Morsink, 1970). Cette forte représentation des feuillus peut également être considérée comme un facteur limitant les conditions propices aux incendies. En

effet, ces espèces sont généralement moins combustibles que les conifères en raison de la plus grande teneur en humidité de leurs feuilles par rapport aux aiguilles de conifères (Park et al., 2024), induisant probablement une rétroaction négative sur les incendies.

Les conditions peu propices aux feux de forêt durant cette période chaude, similairement aux études de Collins et al., (in press) et Lesven, (2024), démontrent que la température joue un rôle direct relativement faible sur les taux de brûlage dans l'est du Québec, et donc sur la dynamique de végétation. Cette dynamique est aussi observable sur nos reconstitutions de feux (Figure 13). Magnan and Garneau, (2014) démontrent que l'ACM est marquée par une humidité importante dans notre zone d'étude, parmi les plus élevées du Néoglaciale, ce qui limite l'assèchement du combustible végétal et, par conséquent, réduit probablement la fréquence et la propagation des incendies à cette période. Ces conditions limitent la colonisation des taxons sensibles aux perturbations, induisant une influence faible sur la composition végétale (Magnan and Garneau, 2014).

Malgré ces taux de brûlage faibles et des conditions plus chaudes que précédemment, l'épinette noire reste largement dominante à travers cette période. Collins et al., (in press) suggèrent que les conifères boréaux demeurent en faible abondance à cette période, ce qui n'est pas remarqué dans nos sites d'étude. En effet, les deux lacs se trouvent dans des environnements suffisamment septentrionaux pour limiter l'expansion des arbres à feuilles caduques, permettant ainsi la croissance prédominante des conifères boréaux. Collins et al., (in press) ont supposé que la combinaison de ces conditions, caractérisée par une température modérément froide, entraîne une réponse atténuée de la végétation aux fluctuations directes de la température, dont la dynamique est principalement régie par les régimes de perturbation et en particulier par le feu (Splawinski et al., 2018). L'étude de Fréchette et al., (2021) démontre qu'au sein du domaine bioclimatique de la pessière à mousse, l'épinette noire reste l'espèce dominante, malgré une augmentation du sapin baumier. Ce dernier persiste dans des conditions de feux fréquents et de petite taille (Remy et al., 2017), ainsi que de la présence d'un couvert forestier offrant des conditions d'ombrage favorables à son établissement et à sa croissance (Blum et al., 1981). Cette colonisation s'effectue au détriment du pin gris, espèce sérotineuse (Gauthier et al., 1993), qui est dans l'incapacité de se reproduire à des intervalles de retour de feu supérieurs à environ 150 ans (Bergeron, 1998). Le feu est donc le facteur limitant la colonisation du pin gris vers l'est (Campbell and Flannigan, 2000; Asselin et al., 2003).

B. Petit Âge Glaciaire

Lors du PAG, la végétation se compose principalement sur les deux lacs d'épinette noire et de bouleau, accompagnés en moindre abondance du sapin baumier, de l'aulne rugueux et de l'aulne crispé. Les astéracées et les éricacées font leur apparition à cette période, de manière plus prononcée sur le lac 6 que sur le lac Rosette. Les données climatiques illustrent une baisse moyenne des températures de $-2,2^{\circ}\text{C}$ comparé à la période précédente. Les conditions qui prévalent n'étaient pas favorables à la croissance de la végétation (Delwaide et al., 2021). Ces conditions sont à l'origine de feux plus fréquents et de plus haute sévérité au Nouveau-Brunswick, comme le démontrent Collins et al., (in press). Cette tendance à la hausse est aussi retrouvée sur les reconstitutions de feux du lac 6 et du lac Rosette, avec une fréquence de feu deux fois plus élevée que celle retrouvée durant l'ACM. Il en est de même pour la taille de feu sur le lac Rosette, qui elle est multipliée par 6 à cette période, alors que la biomasse brûlée suit une évolution similaire. Cette forte augmentation de l'inflammabilité des paysages est expliquée par un climat plus sec que précédemment (Magnan and Garneau, 2014). En effet, Ali et al., (2025) suggèrent que c'est principalement la sécheresse printanière qui tend à s'accroître à cette période. Cette activité incendiaire favorise le développement d'espèces inflammables (Rogers et al., 2015), comme il est possible de le voir sur nos diagrammes avec une augmentation de l'épinette noire, en particulier sur le lac Rosette. Lesven, (2024) confirme ce développement accru au sein de la pessière à mousse de l'est du Québec, où des températures plus froides et une fréquence élevée des feux sont favorables à l'épinette noire. En effet, ses cônes sérotineux permettent une reproduction grâce aux feux de forêt (Splawinski et al., 2022). Bien que la fréquence des incendies ait augmenté durant cette période, le pin gris demeure peu représenté dans nos diagrammes polliniques, probablement car les intervalles de retour du feu restent toujours trop longs pour cette espèce sérotineuse. Toutefois, il est possible de remarquer une augmentation progressive de l'abondance de l'aulne crispé, du bouleau, des éricacées et des astéracées, notamment sur le lac 6, taxons pionniers et indicateurs d'environnements ouverts, en particuliers après de grands incendies (Gajewski et al., 2021; Lesven, 2024).

Lesven, (2024) suggère que les températures froides ont joué un rôle majeur sur la végétation durant cette période, en entraînant une coniférisation progressive du paysage, au détriment des feuillus. Cependant, ces contraintes vont inhiber le développement des espèces intolérantes au feu, telles que le sapin baumier (Feussom Tcheumeleu et al., 2023). De plus, Remy et al., (2017) ont constaté que sa diminution était davantage liée à l'augmentation de la taille des incendies.

C. Réchauffement actuel

Progressivement, vers 150 cal. yrs BP, l'occurrence des incendies, leur taille et la biomasse brûlée diminuent, comme en témoigne l'étude de Feussom Tcheumeleu et al., (2023), tandis que les températures augmentent. Ces conditions ont généré l'allumage d'un seul incendie significatif, sur les deux lacs étudiés. Enfin, ces changements, qui marquent une transition vers le réchauffement actuel, se traduisent dans la dynamique de la végétation par une diminution progressive de l'épinette noire et de l'aulne crispé jusqu'à la fin du PAG, au profit du bouleau, du pin blanc et de l'aulne rugueux.

Les espèces dominant la période du réchauffement climatique anthropique restent l'épinette noire, le bouleau, accompagnées par le sapin baumier, l'aulne rugueux et le pin blanc. Les données de température basées sur les chironomes n'enregistrent pas l'augmentation récente des températures ; cependant de nombreuses études ont enregistré une hausse significative des températures depuis le début de la période postindustrielle sous l'effet de l'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre par les activités humaines (Field et al., 2014; IPCC, 2022). Nos données démontrent une baisse significative et conjointe de la biomasse brûlée, de la fréquence de feu et de la taille des incendies durant cette période, similairement à d'autres études dans l'est du Canada (Weir et al., 2000; Bergeron et al., 2001). Cette diminution de l'activité des feux est attribuée à l'augmentation des températures qui sont à l'origine de taux d'évapotranspiration plus élevés (Bergeron and Archambault, 1993; Tam et al., 2019), induisant une hausse de l'humidité de l'air (Bergeron and Archambault, 1993) qui n'est pas compensée par l'accroissement des températures (Tam et al., 2019). Ces conditions plus humides que précédemment vont donc favoriser les taxons intolérants au feu, en particulier le sapin baumier (Blum et al., 1981). Les reconstitutions de végétation réalisées sur nos deux sites d'étude indiquent également une progression du pin blanc, une espèce thermophile (Fréchette et al., 2021), ainsi que du bouleau, de l'aulne rugueux, et du mélèze laricin, mais uniquement sur le lac Rosette. Cependant, l'aulne crispé, indicateur de perturbations et de paysages ouverts, chute brusquement du fait d'une diminution de l'activité incendiaire dans la région (Lesven, 2024). Une augmentation d'indicateurs d'activités anthropiques tels que les astéracées et les amaranthacées est aussi remarquée. Enfin, le pin gris n'a toujours pas colonisé les sites d'études, probablement du fait de longs intervalles sans feu, ne générant pas une situation favorable à sa colonisation (Despons and Payette, 1992; Asselin et al., 2003).

2. Relation spatiale entre les deux sites d'études

Malgré des ressemblances sur les deux sites d'études, il est possible de constater quelques différences caractéristiques, notamment sur l'activité incendiaires des deux lacs. En effet, au lac Rosette, la taille des feux est 1,8 fois supérieure à celle observée au lac 6, et la biomasse brûlée y est trois fois plus élevée. À l'opposé, sur le lac 6, la fréquence de feu est largement plus élevée, avec environ quatre feux par millénaire avant 550 cal. yrs BP, suivi de dix feux par millénaire (Figure 12). Sur le lac Rosette, la fréquence des feux était plus faible avant ~1 000 cal. yrs BP, avec en moyenne un événement de feu par millénaire. Par la suite, l'intervalle s'est réduit, atteignant une fréquence de quatre à cinq feux par millénaire (Figure 11).

Ces différences peuvent s'expliquer par le gradient d'humidité qui existe entre les lacs. En effet, la proximité du lac 6 au Golfe du Saint-Laurent lui confère une humidité plus élevée que sur le lac Rosette. Celui-ci étant proche des côtes, le gradient d'humidité s'y trouve plus élevé qu'au niveau des zones plus continentales (Brandt et al., 2013). Ceci est confirmé par les précipitations annuelles moyennes de 1 024,4 mm et une température moyenne annuelle moyenne de -0,34°C entre 1981 et 2020 pour le lac 6. À l'inverse, le lac Rosette présente un climat plus chaud, avec une température annuelle moyenne de 0,63°C et des précipitations annuelles moyennes de 972,9 mm sur la même période. Cette humidité est probablement à l'origine des variations de taille des feux (Magnan and Garneau, 2014) et de leur intensité (Jain et al., 2022) entre les lacs, limitant le brûlage du combustible sur de vastes superficies. Cette tendance est également soulignée par Ali et al., (2025), qui indiquent que l'augmentation de l'humidité favorise des feux plus fréquents mais de moindre ampleur, contrairement à ce qui est observé au lac Rosette, notamment durant le PAG. La topographie constitue également un facteur déterminant du comportement des incendies (Pelletier et al., 2009). Le bassin du lac Rosette, caractérisé par des pentes plus prononcées (Gouvernement du Québec, 2025), favorise le dessèchement de la végétation sous l'effet de la chaleur et, par conséquent, une propagation et une intensité accrues des feux sur le haut des versants (Pelletier et al., 2009). De plus, situé à une altitude légèrement supérieure (468 m) à celle du lac 6 (413 m), le lac Rosette est soumis à des vents plus forts, un rayonnement solaire plus élevé et une humidité relative plus faible que le lac de Sept-Îles (Pelletier et al., 2009).

Cette activité incendiaire se reflète dans la dynamique de la végétation entre les deux lacs. Le lac 6 présente une colonisation plus marquée par les feuillus, avec une proportion accrue de bouleau, essence caractéristique de la forêt mixte tempérée (Fréchette et al., 2021), d’aulne rugueux, ainsi que de sapin baumier, une espèce intolérante aux feux de grande ampleur (Remy et al., 2017). La récurrence de petits incendies à faible ampleur a permis le maintien et la coexistence d’espèces de conifères sensibles au feu (Ali et al., 2025). De plus, bien que le sapin baumier soit un faible producteur de pollen, sa proportion relative comprise entre 5 et 10 % sur le lac 6 témoigne d’une forte dominance (Fréchette et al., 2018). En comparaison, le lac Rosette est caractérisé par une augmentation progressive de l’épinette noire, une espèce typiquement boréale (Fréchette et al., 2021), tout au long des périodes étudiées.

Conclusion

Les résultats de cette étude et leur analyse permettent d’apporter des éléments de réponse aux hypothèses initiales. Il apparaît que la dynamique de la végétation est principalement conditionnée par la fréquence et la taille des incendies sur nos sites d’étude, conséquence indirecte des variations de température et de sécheresse au cours du temps. Ainsi, une hausse des températures couplée à une faible occurrence des feux, comme observé durant l’ACM, ne semble pas avoir eu d’impact majeur sur la végétation sur les deux sites d’étude. À l’opposé, des incendies plus fréquents et des températures plus basses (PAG) entraînent une coniférisation du milieu, avec un développement important de l’épinette noire, particulièrement au niveau du lac Rosette. Malgré ces variations locales et climatiques, l’épinette noire demeure l’espèce dominante sur les deux lacs, avec des proportions fluctuantes au fil des périodes climatiques.

L’analyse des résultats met en évidence l’influence déterminante du gradient d’humidité sur la dynamique de la végétation et le régime de feux. Au lac 6, des conditions plus humides, particulièrement durant le réchauffement actuel, ont entraîné une réduction de la taille des incendies et de la biomasse brûlée, tout en maintenant une fréquence de feux importante. Ce régime de perturbations, caractérisé par des incendies de faible ampleur mais récurrents, a favorisé l’implantation d’espèces intolérantes aux feux de grande sévérité, telles que le sapin baumier, l’aulne rugueux ou encore le bouleau. À l’inverse, le lac Rosette, moins influencé par l’humidité en raison de son éloignement du golfe du Saint-Laurent, présente un régime de feux marqué par des incendies de plus grande intensité mais moins fréquents,

favorisant le développement d'espèces tolérantes au feu. Ainsi, la deuxième hypothèse qui suggère une diminution de la fréquence des feux en conditions plus humides est rejetée. Cependant, la deuxième partie de cette même hypothèse qui affirme que ces conditions favorisent le développement des feuillus est retenue. Ensuite, la dernière hypothèse qui suggère que le gradient d'humidité entre les deux lacs influe les conditions locales est à moitié retenue, car comme expliqué précédemment, une forte humidité va favoriser de petits incendies fréquents, comme c'est le cas sur le lac 6. Cependant, ces conditions vont permettre le développement d'espèces moins tolérantes aux feux de grande ampleur.

Enfin, il serait pertinent de reconstituer l'impact de la TBE sur les secteurs étudiés, en portant une attention particulière à la dynamique du sapin baumier. De plus, afin de mieux comprendre l'évolution de la végétation au sein de la pessière à mousse à l'échelle millénaire et séculaire, un échantillonnage plus étendu de lacs serait intéressant.

Bibliographie

Articles:

- Ali A, Gaboriau D, Lesven J, Girardin M, Remy C, Arseneault D, deLafontaine G, Danneyrolles V, Asselin H, Gennaretti F, et al (2025) Drying spring accelerates transitions toward pyrogenic vegetation in eastern boreal North America.
- Ali AA, Blarquez O, Girardin MP, Hély C, Tinquaut F, El Guellab A, Valsecchi V, Terrier A, Bremond L, Genries A, et al (2012) Control of the multimillennial wildfire size in boreal North America by spring climatic conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109: 20966–20970
- Appleby PG, Oldfield F, Thompson R, Huttunen P, Tolonen K (1979) ^{210}Pb dating of annually laminated lake sediments from Finland. *Nature* 280: 53–55
- Arseneault D, Payette S (1997) RECONSTRUCTION OF MILLENNIAL FOREST DYNAMICS FROM TREE REMAINS IN A SUBARCTIC TREE LINE PEATLAND. *Ecology* 78: 1873–1883
- Asnong H, Richard P (2003) La végétation et le climat postglaciaires du centre et de l'est de la Gaspésie, au Québec. *gpq* 57: 37–63
- Asselin H, Payette S (2005) Late Holocene opening of the forest tundra landscape in northern Québec, Canada. *Global Ecology and Biogeography* 307–313
- Asselin H, Payette S, Fortin M-J, Vallée S (2003) The northern limit of *Pinus banksiana* Lamb. in Canada: explaining the difference between the eastern and western distributions. *Journal of Biogeography* 30: 1709–1718
- Bajolle L, Larocque-Tobler I, Gandouin E, Lavoie M, Bergeron Y, Ali AA (2018) Major postglacial summer temperature changes in the central coniferous boreal forest of Quebec (Canada) inferred using chironomid assemblages. *Journal of Quaternary Science* 33: 409–420
- Barber DC, Dyke A, Hillaire-Marcel C, Jennings AE, Andrews JT, Kerwin MW, Bilodeau G, McNeely, Southon J, Morehead MD, et al (1999) Forcing of the cold event of 8,200 years ago by catastrophic drainage of Laurentide lakes | *Nature*. *Nature* 400: 344–348
- Berger A, Loutre MF (1991) Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews* 10: 297–317

- Bergeron Y, 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.” *The Holocene* 3: 255–259
- Bergeron Y, Denneler B, Charron D, Girardin M-P (2001) Using dendrochronology to reconstruct disturbance and forest dynamics around Lake Duparquet, northwestern Quebec. *Dendrochronologia* 20: 175–189
- Bergeron Y, Lefort P, Gauthier S, Kafka V, Flannigan M (2003) Le régime de feux de la forêt mixte et boréale de l’Ouest du Québec. *Chaire en aménagement forestier durable—5e note de recherche*, Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue
- Bergeron Y, Richard PJH, Carcaillet C, Gauthier S, Flannigan M, Prairie YT (1998) Variability in Fire Frequency and Forest Composition in Canada’s Southeastern Boreal Forest: A Challenge for Sustainable Forest Management. *Conservation Ecology* 2:
- Berkes F, Davidson-Hunt IJ (2006) Biodiversity, traditional management systems, and cultural landscapes: examples from the boreal forest of Canada. *Int Social Sci J* 58: 35–47
- Bossé M-E, Bergeron Y (2024) Protéger nos forêts, protéger nos communautés : s’adapter aux feux de forêt dans un climat changeant. *climatoscope* 13–17
- Bouchard M, Pothier D, Gauthier S (2008) Fire return intervals and tree species succession in the North Shore region of eastern Quebec. *Can J For Res* 38: 1621–1633
- Boulanger Y, Arseneault D, Bélisle AC, Bergeron Y, Boucher J, Boucher Y, Danneyrolles V, Erni S, Gachon P, Girardin MP, et al (2025) The 2023 wildfire season in Québec: an overview of extreme conditions, impacts, lessons learned, and considerations for the future. *Can J For Res* 55: 1–21
- Brandt J (2009) The extent of the North American boreal zone. *Environ Rev* 17: 101–161
- Brandt JP, Flannigan MD, Maynard DG, Thompson ID, Volney WJA (2013) An introduction to Canada’s boreal zone: ecosystem processes, health, sustainability, and environmental issues. *Environ Rev* 21: 207–226
- Brossier B, Oris F, Finsinger W, Asselin H, Bergeron Y, Ali AA (2014) Using tree-ring records to calibrate peak detection in fire reconstructions based on sedimentary charcoal records. *The Holocene* 24: 635–645

- Carcaillet C, Bergeron Y, Richard PJH, Fréchette B, Gauthier S, Prairie YT (2001) Change of fire frequency in the eastern Canadian boreal forests during the Holocene: does vegetation composition or climate trigger the fire regime? *Journal of Ecology* 89: 930–946
- Carcaillet C, Richard PJH. (2000) Holocene changes in seasonal precipitation highlighted by fire incidence in eastern Canada. *Climate Dynamics* 16: 549–559
- Chen C, Weiskittel A, Bataineh M, MacLean DA (2017) Even low levels of spruce budworm defoliation affect mortality and ingrowth but net growth is more driven by competition. *Can J For Res* 47: 1546–1556
- Collins RJ, St-Jacques J-M, Kyle KA, Cwynar LC, Cogbill CV (in press) High-resolution forest and fire dynamics from Fish Lake, New Brunswick, Canada, during the last millennium.
- Costanza R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, Paruelo J, Raskin RG, Sutton P (1998) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological economics* 25: 3–15
- Couillard P-L, Payette S, Lavoie M, Frégeau M (2018) Macrocharcoal-Based Chronosequences Reveal Shifting Dominance of Conifer Boreal Forests Under Changing Fire Regime. *Ecosystems* 21: 1183–1195
- Couillard P-L, Payette S, Lavoie M, Laflamme J (2019) La forêt boréale du Québec : influence du gradient longitudinal. *natcan* 143: 18–32
- Dalton AS, Margold M, Stokes CR, Tarasov L, Dyke AS, Adams RS, Allard S, Arends HE, Atkinson N, Attig JW, et al (2020) An updated radiocarbon-based ice margin chronology for the last deglaciation of the North American Ice Sheet Complex. *Quaternary Science Reviews* 234: 106223
- Delwaide A, Asselin H, Arseneault D, Lavoie C, Payette S (2021) A 2233-year tree-ring chronology of subarctic black spruce (*Picea mariana*): growth forms response to long-term climate change. *Écoscience* 28: 399–419
- Despons M, Payette S (1992) Recent dynamics of jack pine at its northern distribution limit in northern Quebec. *Can J Bot* 70: 1157–1167
- Djamali M, Cilleros K (2020) Statistically significant minimum pollen count in Quaternary pollen analysis; the case of pollen-rich lake sediments. *Review of Palaeobotany and Palynology* 275: 104156

- D'Orangeville L, Duchesne L, Houle D, Kneeshaw D, Côté B, Pederson N (2016) Northeastern North America as a potential refugium for boreal forests in a warming climate. *Science* 352: 1452–1455
- D'Orangeville L, Houle D, Duchesne L, Phillips RP, Bergeron Y, Kneeshaw D (2018) Beneficial effects of climate warming on boreal tree growth may be transitory. *Nature communications* 9: 3213
- Dyke AS (2004) An outline of North American deglaciation with emphasis on central and northern Canada. *Developments in quaternary sciences* 2: 373–424
- Dyke AS, Andrews JT, Clark PU, England JH, Miller GH, Shaw J, Veillette JJ (2002) The Laurentide and Innuitian ice sheets during the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews* 21: 9–31
- Dyke AS, Vincent JS, Andrews JT, Dredge LA, Cowan WR (1989) The Laurentide Ice Sheet and an introduction to the Quaternary geology of the Canadian Shield.
- Erni S, Wang X, Taylor S, Boulanger Y, Swystun T, Flannigan M, Parisien M-A (2020) Developing a two-level fire regime zonation system for Canada. *Can J For Res* 50: 259–273
- Fægri K, Iversen J (1975) *Textbook of pollen analysis*. 295
- Feussom Tcheumeleu A, Millet ,Laurent, Rius ,Damien, Ali ,Adam A., Bergeron ,Yves, Grondin ,Pierre, Gauthier ,Sylvie, and Blarquez O (2023) An 8500-year history of climate-fire-vegetation interactions in the eastern maritime black spruce–moss bioclimatic domain, Québec, Canada. *Écoscience* 0: 1–17
- Flannigan MD, Logan KA, Amiro BD, Skinner WR, Stocks BJ (2005) Future Area Burned in Canada. *Climatic Change* 72: 1–16
- Gajewski K (2019) Environmental history of the northwestern Québec Treeline. *Quaternary Science Reviews* 206: 29–43
- Gajewski K, Grenier A, Payette S (2021) Climate, fire and vegetation history at treeline east of Hudson Bay, northern Québec. *Quaternary Science Reviews* 254: 106794
- Gajewski K, Neil K, Ponomarenko E, Ershova E, Stewart B, Neily P, Quigley E (2023) Climate, fire disturbance regime, and vegetation response of the past 2500 years for central Nova Scotia. *Ecosphere* 14: e4710

- Gauthier S, Bergeron Y, Simon J-P (1993) Cone serotiny in jack pine: ontogenetic, positional, and environmental effects. *Can J For Res* 23: 394–401
- Gauthier S, Bernier P, Kuuluvainen T, Shvidenko AZ, Schepaschenko DG (2015) Boreal forest health and global change. *Science* 349: 819–822
- Gennaretti F, Arseneault D, Nicault A, Bégin Y (2014) Volcano-induced regime shifts in millennial tree-ring chronologies from northeastern North America | PNAS. doi: [10077-10082](https://doi.org/10.1073/pnas.1400771111)
- Girard F, Payette S, 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
- Girardin MP, Ali AA, Carcaillet C, Blarquez O, Hély C, Terrier A, Genries A, Bergeron Y (2013a) Vegetation limits the impact of a warm climate on boreal wildfires. *New Phytologist* 199: 1001–1011
- Girardin MP, Ali AA, Carcaillet C, Gauthier S, Hély C, Le Goff H, Terrier A, Bergeron Y (2013b) Fire in managed forests of eastern Canada: Risks and options. *Forest Ecology and Management* 294: 238–249
- Gottardini E, Cristofolini F, Cristofori A, Vannini A, Ferretti M (2009) Sampling bias and sampling errors in pollen counting in aerobiological monitoring in Italy. *Journal of Environmental Monitoring* 11: 751–755
- Grimm EC (1987) CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers & geosciences* 13: 13–35
- Hanes CC, Wang X, Jain P, Parisien M-A, Little JM, Flannigan MD (2018) Fire-regime changes in Canada over the last half century. *Canadian Journal of Forest Research*. doi: [10.1139/cjfr-2018-0293](https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0293)
- Hassan R, Scholes R, Ash N (2005) Ecosystems and human well-being: current state and... - Google Scholar.
- Havyarimana F, Bigendako MJ, Masharabu T, Bangirinama F, Lejoly J, Barima YSS, De Cannière C, Bogaert J (2013) Diversité et distribution d'abondances des plantes d'un écosystème protégé dans un paysage anthropisé: cas de la Réserve Naturelle Forestière de Bururi, Burundi. *Tropicultura* 31

- Helama S, Jones PD, Briffa KR (2017) Dark Ages Cold Period: A literature review and directions for future research. *The Holocene* 27: 1600–1606
- Helama S, Timonen M, Lindholm M, Meriläinen J, Eronen M (2005) Extracting long-period climate fluctuations from tree-ring chronologies over timescales of centuries to millennia. *Intl Journal of Climatology* 25: 1767–1779
- Hennebelle A, Aleman JC, Ali AA, Bergeron Y, Carcaillet C, Grondin P, Landry J, Blarquez O (2020) The reconstruction of burned area and fire severity using charcoal from boreal lake sediments. *The Holocene* 30: 1400–1409
- Higuera P (2009) CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis. User's Guide. Montana State University, University of Illinois. URL: <http://CharAnalysis.googlepages.com>
- Jain P, Castellanos-Acuna D, Coogan SCP, Abatzoglou JT, Flannigan MD (2022) Observed increases in extreme fire weather driven by atmospheric humidity and temperature. *Nat Clim Chang* 12: 63–70
- Jain P, Wang X, Flannigan MD (2017) Trend analysis of fire season length and extreme fire weather in North America between 1979 and 2015. *Int J Wildland Fire* 26: 1009–1020
- Johnson EA, Miyanishi K (2012) The boreal forest as a cultural landscape. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1249: 151–165
- Johnstone J, Boby L, Tissier E, Mack M, Verbyla D, Walker X (2009) Postfire seed rain of black spruce, a semiserotinous conifer, in forests of interior Alaska. *Can J For Res* 39: 1575–1588
- Kneeshaw D, Gauthier S (2003) Old growth in the boreal forest: A dynamic perspective at the stand and landscape level. *Environ Rev* 11: S99–S114
- Lafontaine-Boyer K, Gajewski K (2014) Vegetation dynamics in relation to late Holocene climate variability and disturbance, Outaouais, Québec, Canada. *The Holocene* 24: 1515–1526
- Larocque I, Bergeron Y, Campbell ID, Bradshaw R (2000) Vegetation changes through time on islands of Lake Duparquet, Abitibi, Canada. *Can J For Res* 30: 179–190
- Le Roux G, Marshall WA (2011) Constructing recent peat accumulation chronologies using atmospheric fall-out radionuclides. *Mires and Peat* 7: 08

- Lesieur D, Gauthier S, Bergeron Y (2002) Fire frequency and vegetation dynamics for the south-central boreal forest of Quebec, Canada. *Canadian journal of forest research*, 32: 1996–2009
- Lesven J, Millet L, Gillet F, Suranyi T, Feussom Tcheumeleu A, Bajolle L, Bergeron Y, Arsenault A, Remy CC, Ali AA, et al (in press) Influence of environmental factors on pollen- and chironomid-based Holocene temperature inferences: a multisite comparison in eastern Canada.
- Lindbladh M, Fraver S, Edvardsson J, Felton A (2013) Past forest composition, structures and processes – How paleoecology can contribute to forest conservation. *Biological Conservation* 168: 116–127
- Liu M, Shen Y, González-Sampériz P, Gil-Romera G, Ter Braak CJ, Prentice IC, Harrison SP (2023) Holocene climates of the Iberian Peninsula: pollen-based reconstructions of changes in the west-east gradient of temperature and moisture. *Climate of the Past Discussions* 2021: 1–30
- Lynch JA, Clark JS, Stocks BJ (2004) Charcoal production, dispersal, and deposition from the Fort Providence experimental fire: interpreting fire regimes from charcoal records in boreal forests. *Can J For Res* 34: 1642–1656
- Mackay H, Amesbury MJ, Langdon PG, Charman DJ, Magnan G, van Bellen S, Garneau M, Bainbridge R, Hughes PD (2021) Spatial variation of hydroclimate in north-eastern North America during the last millennium. *Quaternary Science Reviews* 256: 106813
- Magnan G, Garneau M (2014) Climatic and autogenic control on Holocene carbon sequestration in ombrotrophic peatlands of maritime Quebec, eastern Canada. *The Holocene* 24: 1054–1062
- Marlon JR, Pederson N, Nolan C, Goring S, Shuman B, Robertson A, Booth R, Bartlein PJ, Berke MA, Clifford M (2017) Climatic history of the northeastern United States during the past 3000 years. *Climate of the Past* 13: 1355–1379
- McAndrews JH, Berti AA, Norris G (1973) Key to the Quaternary pollen and spores of the Great... - Google Scholar.
- Mery G, Katila P, Galloway G, Alfaro RI, Kanninen M, Lobovikov M, Varjo J (2010) Forests and society-responding to global drivers of change.

- Milankovitch MK (1941) Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. Royal Serbian Academy Special Publication 133: 1–633
- Morsink W (1970) A suggested frost injury rating system for clones of trees. Canadian Journal of Botany
- Oberndorfer E (2020) What the blazes!? A people's history of fire in Labrador. Journal of the North Atlantic 2020: 1–16
- Oksanen J (2015) Vegan: an introduction to ordination. URL <http://cran.r-project.org/web/packages/vegan/vignettes/introvegan.pdf> 8: 19
- Oris F, Ali AA, Asselin H, Paradis L, Bergeron Y, Finsinger W (2014) Charcoal dispersion and deposition in boreal lakes from 3 years of monitoring: Differences between local and regional fires. Geophysical Research Letters 41: 6743–6752
- Pan Y, Birdsey RA, Fang J, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, Phillips OL, Shvidenko A, Lewis SL, Canadell JG, et al (2011) A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. Science 333: 988–993
- Paquette N, Gajewski K (2013) Climatic change causes abrupt changes in forest composition, inferred from a high-resolution pollen record, southwestern Quebec, Canada. Quaternary Science Reviews 75: 169–180
- Park J, Moon M, Green T, Kang M, Cho S, Lim J, Kim S-J (2024) Impact of tree species composition on fire resistance in temperate forest stands. Forest Ecology and Management 572: 122279
- Payette S, Delwaide A (2018) Tamm review: the North-American lichen woodland. Forest Ecology and Management 417: 167–183
- Pelletier H, Pouliot L, Quenneville R, Robitaille D (2009) Le feu en milieu forestier. Manuel de forestier 37: 1039–1090
- Peng C, Ma Z, Lei X, Zhu Q, Chen H, Wang W, Liu S, Li W, Fang X, Zhou X (2011) A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests. Nature climate change 1: 467–471
- Portier J, Gauthier S, Leduc A, Arseneault D, Bergeron Y (2016) Fire Regime along Latitudinal Gradients of Continuous to Discontinuous Coniferous Boreal Forests in Eastern Canada.

- Reimer PJ, Austin WE, Bard E, Bayliss A, Blackwell PG, Ramsey CB, Butzin M, Cheng H, Edwards RL, Friedrich M (2020) The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62: 725–757
- Remy CC, Hély C, Blarquez O, Magnan G, Bergeron Y, Lavoie M, Ali AA (2017) Different regional climatic drivers of Holocene large wildfires in boreal forests of northeastern America. *Environ Res Lett* 12: 035005
- Renssen H, Seppä H, Crosta X, Goosse H, Roche DM (2012) Global characterization of the Holocene Thermal Maximum. *Quaternary Science Reviews* 48: 7–19
- Renssen H, Seppä H, Heiri O, Roche DM, Goosse H, Fichet T (2009) The spatial and temporal complexity of the Holocene thermal maximum. *Nature Geosci* 2: 411–414
- Richard P, Fréchette B, Grondin P, Lavoie M (2020) Histoire postglaciaire de la végétation de la forêt boréale du Québec et du Labrador. *natcan* 144: 63–76
- Richard P, Labelle C (1989) Histoire postglaciaire de la végétation au lac du Diable, mont Albert, Gaspésie, Québec. *gpq* 43: 337–354
- Richard R (1970) Atlas pollinique des arbres et de quelques arbustes indigènes du Québec. IV. Angiospermes (Rosacées, Anacardacées, Aceracées, Tiliacées, Cornacées, Oleacées, Caprifoliacées). *Naturaliste Canadien* 97: 241–306
- Rogers BM, Soja AJ, Goulden ML, Randerson JT (2015) Influence of tree species on continental differences in boreal fires and climate feedbacks. *Nature Geosci* 8: 228–234
- Saucier J-P, Gosselin J, Morneau C, Grondin P (2010) Utilisation de la classification de la végétation dans l'aménagement forestier au Québec. *Revue forestière française* 62: 428–438
- Sauri Ramirez J (2020) Effet du changement climatique et de la phénologie de l'arbre hôte sur l'étendue spatiale des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette : une approche à base d'agents.
- Scheffer M, Hirota M, Holmgren M, Van Nes EH, Chapin FS (2012) Thresholds for boreal biome transitions. *Proc Natl Acad Sci USA* 109: 21384–21389
- Splawinski TB, Boucher Y, Bouchard M, Greene DF, Gauthier S, Auger I, Sirois L, Bergeron Y (2022) Factors influencing black spruce reproductive potential in the northern boreal forest of Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*

- Splawinski TB, Greene DF, Michaletz ST, Gauthier S, Houle D, Bergeron Y (2018) Position of cones within cone clusters determines seed survival in black spruce during wildfire. *Canadian Journal of Forest Research*
- Stocks BJ, Mason JA, Todd JB, Bosch EM, Wotton BM, Amiro BD, Flannigan MD, Hirsch KG, Logan KA, Martell DL, et al (2002) Large forest fires in Canada, 1959–1997. *J Geophys Res.* doi: [10.1029/2001jd000484](https://doi.org/10.1029/2001jd000484)
- Suranyi T, Talbot J, Francis D, Feussom Tcheumeleu A, Grondin P, Rius D, Ali AA, Bergeron Y, Millet L (2025) Chironomid assemblages in surface sediments from 182 lakes across New England and Eastern Canada: Development and validation of a new summer temperature transfer function. *Quaternary Science Reviews* 357: 109333
- Tam BY, Szeto K, Bonsal B, Flato G, Cannon AJ, Rong R (2019) CMIP5 drought projections in Canada based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques* 44: 90–107
- Ullman DJ, Carlson AE, Hostetler SW, Clark PU, Cuzzone J, Milne GA, Winsor K, Caffee M (2016) Final Laurentide ice-sheet deglaciation and Holocene climate-sea level change. *Quaternary Science Reviews* 152: 49–59
- Viau AE, Gajewski K (2009) Reconstructing Millennial-Scale, Regional Paleoclimates of Boreal Canada during the Holocene. doi: [10.1175/2008JCLI2342.1](https://doi.org/10.1175/2008JCLI2342.1)
- Viau AE, Gajewski K, Sawada MC, Fines P (2006) Millennial-scale temperature variations in North America during the Holocene. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* doi: [10.1029/2005JD006031](https://doi.org/10.1029/2005JD006031)
- Viereck LA, Johnston WF, Burns RM, Honkala BH (1990) *Picea mariana* (Mill.) BSP black spruce. *Silvics of North America* 1: 227–237
- Walker M, Head MJ, Lowe J, Berkelhammer M, Björck S, Cheng H, Cwynar LC, Fisher D, Gkinis V, Long A, et al (2019) Subdividing the Holocene Series/Epoch: formalization of stages/ages and subseries/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes. *Journal of Quaternary Science* 34: 173–186
- Wanner H, Mercolli L, Grosjean M, Ritz SP (2015) Holocene climate variability and change; a data-based review. *JGS* 172: 254–263
- Weber MG, Stocks BJ (1998) Forest fires and sustainability in the boreal forests of Canada. *Ambio* 27: 545–550

- Weir JMH, Johnson EA, Miyanishi K (2000) Fire Frequency and the Spatial Age Mosaic of the Mixed-Wood Boreal Forest in Western Canada. *Ecological Applications* 10: 1162–1177
- Wilson R, Anchukaitis K, Briffa KR, Büntgen U, Cook E, D'Arrigo R, Davi N, Esper J, Frank D, Gunnarson B (2016) Last millennium northern hemisphere summer temperatures from tree rings: Part I: The long term context. *Quaternary Science Reviews* 134: 1–18
- Wotton BM, Nock CA, Flannigan MD (2010) Forest fire occurrence and climate change in Canada. *International Journal of Wildland Fire*, 253–271
- Zhang Q, Chen W (2007) Fire cycle of the Canada's boreal region and its potential response to global change. *Journal of Forestry Research* 18: 55–61

Livres:

- Appleby PG (2001) Chronostratigraphic Techniques in Recent Sediments. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. *Developments in Paleoenvironmental Research*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 171–203
- Campbell ID, Flannigan MD (2000) Long-Term Perspectives on Fire-Climate-Vegetation Relationships in the North American Boreal Forest. *Ecological Studies*. Springer New York, New York, NY, pp 151–172
- Field CB, Barros VR, IPCC (Eds.) (2014) Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability: Working Group II contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: New York, NY. Cambridge University Press
- Flannigan MD, Wotton BM (2001) Chapter 10 - Climate, Weather, and Area Burned. *In* EA Johnson, K Miyanishi, eds, *Forest Fires*. Academic Press, San Diego, pp 351–373
- Fréchette B, Richard PJ, Grondin P, Lavoie M, Larouche AC (2018) Histoire postglaciaire de la végétation et du climat des pessières et des sapinières de l'ouest du Québec. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
- Fréchette B, Richard PJ, Lavoie M, Grondin P, Larouche AC (2021) Histoire postglaciaire de la végétation et du climat des pessières et des sapinières de l'est du Québec et du Labrador méridional. Direction de la recherche forestière, Ministère des forêts, de la faune et ...
- Grondin P, Brice M-H, Boulanger Y, Morneau C, Couillard P-L, Richard PJH, Chalumeau A, Poirier V (2023) Ecological Classification in Forest Ecosystem Management: Links Between Current Practices and Future Climate Change in a Québec Case Study. *In* MM

Girona, H Morin, S Gauthier, Y Bergeron, eds, Boreal Forests in the Face of Climate Change: Sustainable Management. Springer International Publishing, Cham, pp 219–246

Kneeshaw D, Bergeron Y, Kuuluvainen T (2011) Forest ecosystem structure and disturbance dynamics across the circumboreal forest. SAGE, Los Angeles

Teitelbaum S, Asselin H, Bissonnette J-F, Blouin D (2023) Governance in the boreal forest: what role for local and indigenous communities?. Springer International Publishing, Cham

World Bank (2014) Turn down the heat: confronting the new climate normal. World Bank Publications

Carte:

Saucier J-P (2011) Les régions écologiques du Québec méridional.

Thèses:

Ayotte N (2014) Dendroécologie du pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) dans le haut-boréal du Québec. Mémoire de maîtrise. Institut national de la recherche scientifique (INRS), Centre Eau Terre Environnement, Québec, Canada

Bajolle L (2018) Reconstitution des paléotempératures holocènes de la forêt boréale coniférienne de l'ouest du Québec basée sur une approche multi-indicateurs. phdthesis. Université Montpellier ; Université du Québec à Abitibi-Témiscamingue

Lemay-Tougas M (2014) Changements climatiques le long de la Côte Nord de l'Estuaire et du Golfe du Saint-Laurent durant l'Holocène: relation entre les conditions hydrographiques et le développement des tourbières ombrotrophes côtières. PhD Thesis. Université du Québec à Montréal

Lesven J (2024) Changements globaux et dynamiques des pessières du Québec-Labrador au cours de l'Holocène : Approche rétrospective des interactions feu-climat-végétation. phdthesis. Université Bourgogne Franche-Comté ; Université du Québec à Abitibi-Témiscamingue

Subedi A (2023) Évaluation de l'impact du changement climatique sur la défoliation de l'épinette noire par la tordeuse des bourgeons de l'épinette. masters. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda

Rapports:

Baldwin K, Allen L, Basquill S, Chapman K, Downing D, Flynn N, Uhlig P (2020) Zones de végétation du Canada: une perspective biogéoclimatique. Gouvernement du Canada, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault-Sainte-Marie, ON, Rapport d'information GLC-X-25F.

Blum, Barton M, Harold MK, Arthur G (1981) Épinette-sapin du Nord-Est. Dans Choix sylvicoles pour les forêts américaines. 10–15

IPCC (2022) Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability.

Wilke NM (2024) Fire dynamics of the past ~700 years inferred from lake sediments along a latitudinal gradient north of Sept-Îles, Quebec, Canada. 16

Sites internet:

Blaauw M, Lopez JAC (2023) Package “rplum.” The Comprehensive R Archive Network, <https://cran.r-project.org/web/packages/rplum/rplum.pdf>.

Copernicus (2023) Copernicus Browser Sept-Îles. Copernicus Browser, <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>

Gouvernement du Québec (2025) Forêt ouverte. <https://www.foretouverte.gouv.qc.ca/>

Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier (2020) IRN Forêts froides - Groupement de Recherche International Forêts froides. IRN Forêts froides, <https://forets-froides.org/>

Juggins S, Juggins MS (2020) “Package ‘rioja’.” An R Package for the Analysis of Quaternary Science Data.: v. 0.9 26.

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts (2025) Ministère des Ressources naturelles et des Forêts. Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, <https://mrnf.gouv.qc.ca/>

Natural Resources Canada (2023) Canadian Wildland Fire Information System | Interactive map. <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/interactive-map?zoom=6.808294864011342¢er=1957343.2687661927%2C603672.610909578&month=6&day=8&year=2023#iMap>.

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (2025) Station de recherche et Forêt d'enseignement et de recherche du lac Duparquet | UQAT. <https://www.uqat.ca/recherche/foret/station-ferld/>

Annexes

Annexe 1 : Caractéristiques des lacs d'étude dans les régions de Sept-Îles et de Pessamit, dans l'est du Québec, au Canada.

Lac ID	Nom	Région	Latitude - Longitude (DDMMSS / Decimal)	Année de l'échantillonnage	Altitude (m)	Superficie (ha)	Profondeur d'eau (m)	Longueur de la carotte (cm)	Evènements d'incendies régionaux	Période reconstituée [AA]	Fenêtre de lissage (yr)	SNI
6	LO6	Sept-Iles	N 50° 31' 45.6'' W 66° 25' 25.2''	2024	413	40.7	37.2	84.5	11	1234-2024	100	3.85
3	Rosette	Pessamit	N 49° 21' 39.5'' W 69° 59' 04.9''	2024	468	6.7	15	45	9	2065-2024	700	3.37

Annexe 2 : Lac 6 (2024) - N 50°31'43.5''; W 66°25'25.1''



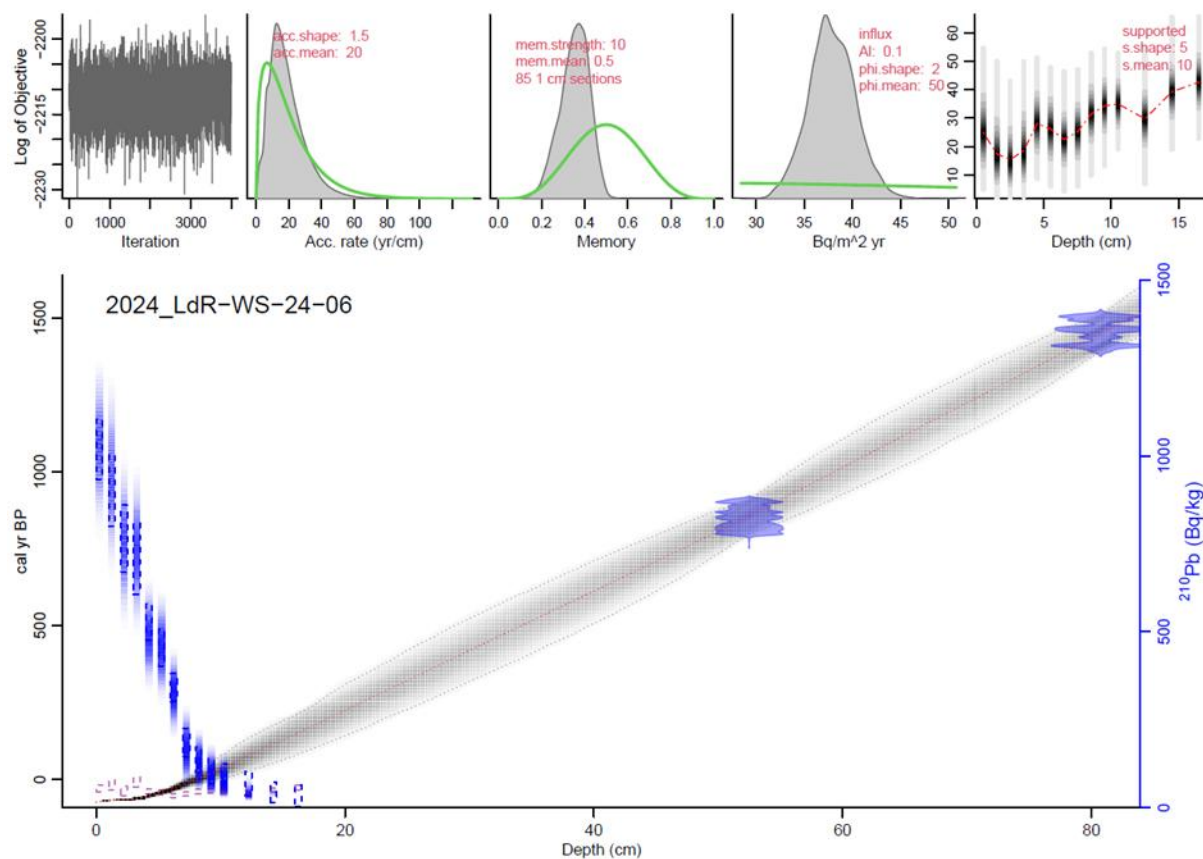
Annexe 3 : Lac Rosette (2024) - N 49°21'40.7''; W 69°59'02.5''



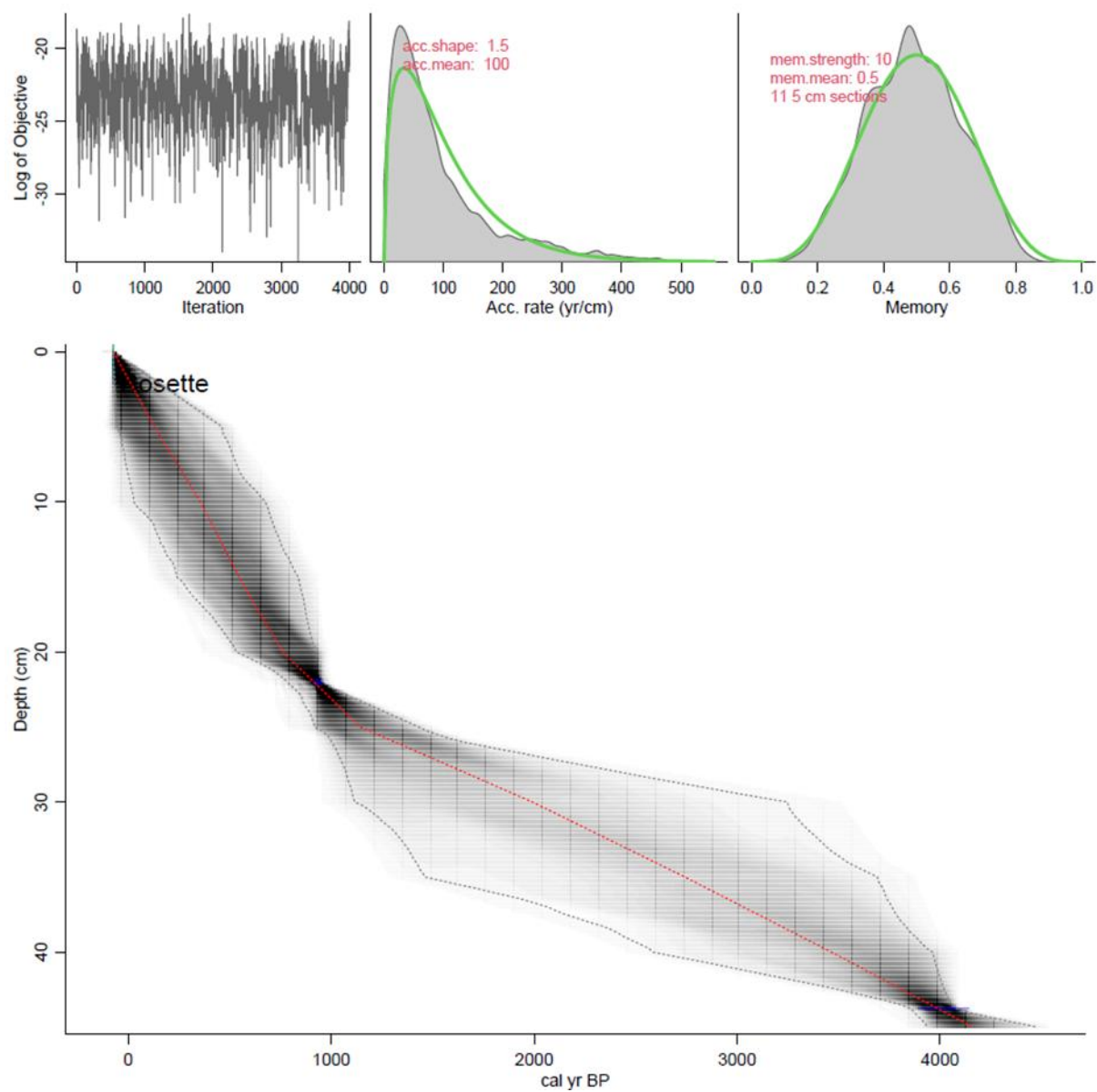
Annexe 4 : Datation au radiocarbone ^{14}C et erreurs d'estimation à partir de macrorestes végétaux dans des carottes de sédiments de différentes profondeurs des régions de Sept-Îles et de Pessamit. L'épaisseur représente la longueur de sédiment utilisée pour la datation au radiocarbone, garantissant ainsi une quantité suffisante de matière nécessaire pour la datation. Les dates AMS ^{14}C ont été converties en âges calendaires avant le présent (cal. BP) à l'aide de la bibliothèque R bacon.

Site	Lab-ID	Depth in the master core (cm)	^{14}C Age (BP)	Error \pm	Thickness (cm)	Cal. Age BP (CI 95%)
Lac 6	UCIAMS- ULA- (KB 52-53)	52.5	940	15	1	849
Lac 6	UCIAMS- ULA- (KB 80-81,5)	81	1565	15	1.5	1462
Rosette	UCIAMS- ULA- (KB 21-23)	22	1020	15	2	936
Rosette	UCIAMS- ULA- (KB 43-44.5)	44	3670	20	1.5	4014

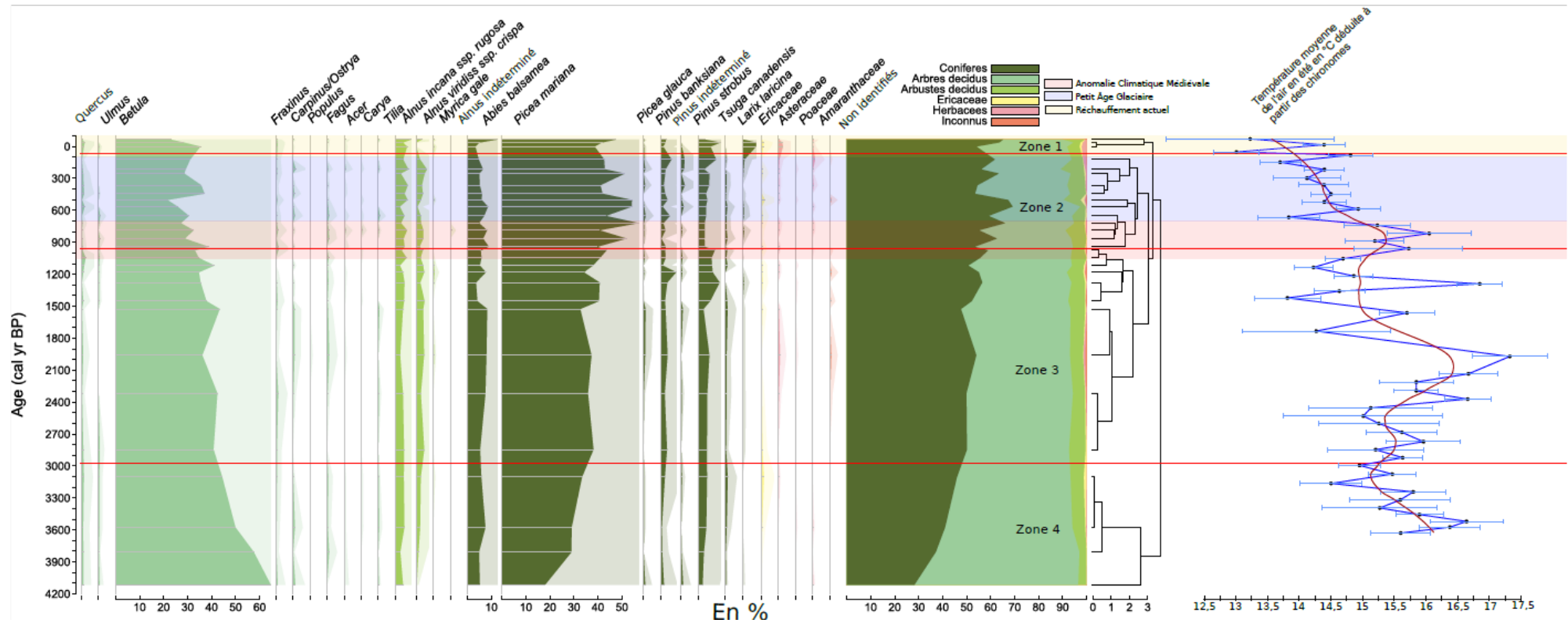
Annexe 5 : Modèle d'âge du lac 6, basé sur l'activité du ^{210}Pb et sur les datations au ^{14}C .



Annexe 6: Modèle d'âge du lac Rosette, basé sur les datations au ^{14}C .



Annexe 7: Diagramme pollinique pour le lac Rosette sur 4 200 cal. yrs BP, selon la température estivale de l'air déduite à partir de chironomes, avec un lissage loess en rouge (pente= 0,25).



Liste des figures et tableaux

Numéro de la figure	Titre	Page
1	Carte de l'activité incendiaire à l'échelle du gradient longitudinal au Québec.	
2	Carte de la localisation de la Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet.	
3	Carte de déglaciation de la calotte glaciaire laurentienne à 8 100 ans AA, au Québec.	
4	Carte des domaines bioclimatiques à l'échelle du Québec, localisation des deux sites d'études.	
5	Chronologie de l'histoire postglaciaire de la végétation au sein des domaines bioclimatiques, à l'est du Québec.	
6	Carte de localisation du lac Rosette au Québec.	

7	Carte de l'intervalle de retour de feu au Québec.	
8	Carte des feux recensés aux alentours du lac 6, en Côte-Nord, Québec.	
9	Carte de la localisation du lac Rosette, en Côte-Nord, Québec.	
10	Carte des feux recensés aux alentours du lac Rosette, en Côte-Nord, Québec.	
11	Sorties du logiciel CharAnalysis, représentant en haut les pics de feux significatifs (croix rouges) et la magnitude des pics de charbons, et en bas les intervalles de retour du feu du lac Rosette.	
12	Sorties du logiciel CharAnalysis, représentant en haut les pics de feux significatifs (croix rouges) et la magnitude des pics de charbons, et en bas les intervalles de retour du feu du lac 6.	

13	<p>Graphique des régimes de feu et variabilité climatique durant l'Holocène. A. Température moyenne de l'air en été en °C déduite à partir des chironomes; B. Taille de feux (FS index); C. Biomasse brûlée (BB); D. Fréquence de feu (FF) du lac 6; E. Fréquence de feu (FF) du lac Rosette.</p>	
14	<p>Diagramme pollinique pour le lac Rosette sur 1 600 cal. yrs BP, selon la température estivale de l'air déduite à partir de chironomes, avec un lissage loess en rouge (pente= 0,25).</p>	
15	<p>Diagramme pollinique pour le lac 6 sur 1 600 cal. yrs BP, selon la température de l'air estival déduite à partir de chironomes et avec un lissage loess en rouge (pente= 0,25).</p>	

16	<p>ACP représentant les relations entre les assemblages polliniques du lac Rosette et la température, la fréquence de feu (FF), biomasse brûlée (BB) et la taille de feu (FS) et l'âge. Seuls les taxons avec les scores d'ACP les plus élevés sont représentés pour faciliter les interprétations écologiques. Les trajectoires observées sont représentées en gradient de bleu.</p>	
17	<p>Corrélations de Spearman du lac Rosette entre les espèces végétales et la température, la fréquence de feu (FF), la biomasse brûlée (BB) et la taille de feu (FS).</p>	
18	<p>ACP représentant les relations entre les assemblages polliniques du lac 6 et la température, la fréquence de feu (FF), biomasse brûlée (BB) et la taille de feu (FS) et l'âge. Seuls les taxons avec les scores d'ACP les plus élevés sont représentés pour faciliter les interprétations écologiques. Les trajectoires observées sont représentées en gradient de bleu.</p>	

19	Corrélations de Spearman du lac 6 entre les espèces végétales et la température, la fréquence de feu (FF), la biomasse brûlée (BB) et la taille de feu (FS).	
Numéro du tableau	Titre	Page
1	Description des grains de pollen.	

Listes des annexes

Numéro de l'annexe	Titre	Page
1	Caractéristiques des lacs d'étude dans les régions de Sept-Îles et de Pessamit, dans l'est du Québec, au Canada.	
2	Lac 6 (2024) - N 50°31'43.5''; W 66°25'25.1''	
3	Lac Rosette (2024) - N 49°21'40.7''; W 69°59'02.5''	
4	Datation au radiocarbone ¹⁴ C et erreurs d'estimation à partir de macrorestes végétaux dans des carottes de sédiments de	

	différentes profondeurs des régions de Sept-Îles et de Pessamit. L'épaisseur représente la longueur de sédiment utilisée pour la datation au radiocarbone, garantissant ainsi une quantité suffisante de matière nécessaire pour la datation. Les dates AMS ^{14}C ont été converties en âges calendaires avant le présent (cal. BP) à l'aide de la bibliothèque R bbacon.	
5	Modèle d'âge du lac 6, basé sur l'activité du ^{210}Pb et sur les datations au ^{14}C .	
6	Modèle d'âge du lac Rosette, basé sur les datations au ^{14}C .	
7	Diagramme pollinique pour le lac Rosette sur 4 200 cal. yrs BP, selon la température estivale de l'air déduite à partir de chironomes, avec un lissage loess en rouge (pente= 0,25).	

Table des matières détaillées

Remerciements.....	
Liste des sigles	
Résumé.....	Erreur ! Signet non défini.
Abstract	2
I. Introduction.....	3
I. Contexte de stage	8
La Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet.....	8
La station de la Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet	10
Le Laboratoire International de Recherche sur les Forêts Froides.....	1Erreur ! Signet non défini.
Forêt boréale en Côte-Nord.....	12
II. Etat de l'art.....	13
1. Du Dryas à l'Holocène.....	13
Transition du climat du dernier maximum glaciaire à l'Holocène	Erreur ! Signet non défini.
2. Variabilité millénaire de l'Holocène.....	15
Variabilité millénaire de l'Holocène dans l'est du Canada et influence sur la végétation..	15
3. Variabilité séculaire au cours du Néoglaciale	24
Événements climatiques rapides de la période Néoglaciale	24
III. Matériel et méthodes.....	26
1. Aire d'étude et caractéristiques des lacs	26
A. Lac 6.....	26
B. Lac Rosette.....	29
2. Récolte des carottes sédimentaires.....	30
3. Chronologies	31
4. Analyse pollinique	31
A. Extraction des grains de pollen	31
B. Identification et comptage des grains de pollen.....	32
5. Reconstitution de la dynamique de végétation	37
6. econstitutions quantitatives des températures estivales	38
7. Reconstitution des variables de feu.....	38

8. Analyses numériques	39
V. Résultats	40
1. Histoire des feux sous l'influence de la variabilité climatique rapide	40
L'Anomalie Climatique Médiévale.....	40
Petit Âge Glaciaire	4Erreur ! Signet non défini.
Période postindustrielle.....	43
2. Trajectoire de la végétation face aux fluctuations climatiques	45
A. Lac Rosette.....	45
B . Lac 6	48
3. Relations climat-feu-végétation entre les deux sites d'étude	52
A. Lac Rosette.....	52
B. Lac 6.....	54
4. Mise en parallèle entre les deux lacs.....	56
VI. Discussion.....	57
1. Influence des facteurs abiotiques (température, gradient d'humidité, feux) sur la dynamique de végétation.....	57
A. Anomalie Climatique Médiévale	57
B. Petit Âge Glaciaire	59
C. Réchauffement actuel.....	60
2. Relation spatiale entre les deux sites d'études	61
Conclusion	62
Bibliographie.....	
Annexes.....	
Listes des annexes.....	
Table des matières détaillées	

Coévolution de la végétation et des régimes de feux en réponse aux principaux épisodes climatiques rapides du dernier millénaire, au niveau de deux lacs situés dans la pessière à mousse de l'est du Québec



Québec

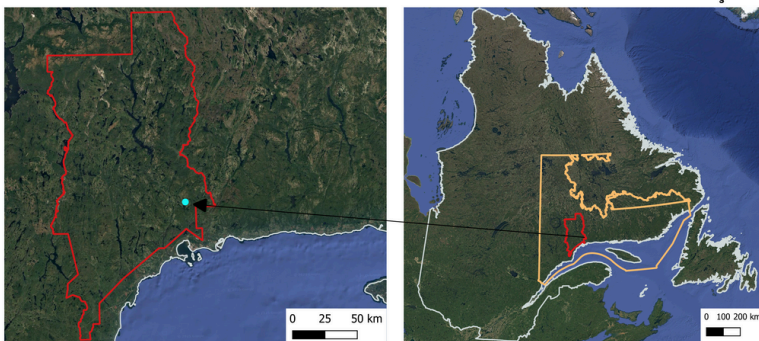
Manon Decrouy M2 GEMO

Du 24 mars au 29 août 2025



Organisme d'accueil : Laboratoire International de Recherche sur les Forêts Froides,
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Cartes de la localisation du lac 6 au sein du Québec



Lac 6:

- Profondeur de glace: 60 cm
- Profondeur d'eau: 37,2 m
- Longueur de la carotte: 84,5 cm
- Altitude: 413 m
- Superficie: 40,7 ha
- Chronologie: Datation ¹⁴C et ²¹⁰Pb

Zone d'étude

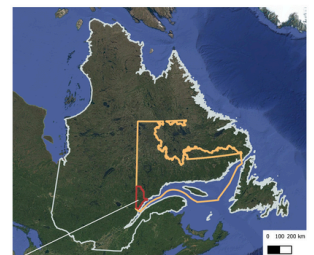
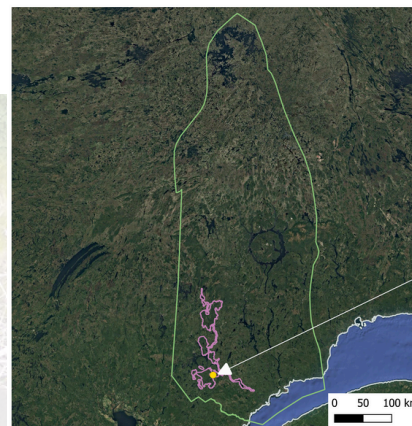
- Lac 6
- Région Côte Nord
- Municipalité de Lac-Walker
- Québec Labrador

Réalisatrice: Manon Decrouy
Date de réalisation: 26/05/2025
Système de projection: Québec Lambert EPSG: 32198
Sources des données: Gouvernement du Québec, FERLD
Date de prise des images satellites: 2025

Lac Rosette:

- Profondeur: 15 m
- Longueur de la carotte: 45 cm
- Altitude: 468 m
- Superficie: 6,7 ha
- Chronologie: Datation ¹⁴C

Cartes de la localisation du Lac Rosette au Québec



Zone d'étude

- Lac Rosette
- Aire protégée Pimpuakan
- Territoire autochtone Nitassinan Pessamit
- Municipalité Lac aux brochets
- Région Côte Nord
- Québec Labrador

Réalisatrice: Manon Decrouy
Date de réalisation: 26/05/2025
Système de projection: Québec Lambert EPSG: 32198
Sources des données: Gouvernement du Québec, FERLD
Date de prise des images satellites: 2025

Hypothèses:

1. L'augmentation des températures durant l'Anomalie Climatique Médiévale (ACM) (1 050 à 700 ans AA) aurait favorisé une dominance des feuillus tempérés, alors que l'augmentation de l'occurrence des feux lors du refroidissement du Petit Âge Glaciaire (PAG) (550 à 100 ans AA), aurait favorisé une dominance accrue des conifères pyrophiles.

2. Les conditions plus humides du XXe siècle auraient réduit la fréquence des feux, entraînant une transition vers des paysages dominés progressivement par les feuillus.

3. Le gradient d'humidité entre les deux lacs d'étude influence les conditions climatiques locales, générant une divergence dans la dynamique des feux et de la végétation. Dans des conditions plus humides, les feux sont moins fréquents, favorisant le développement de feuillus.

Zone d'étude:

- Domaine bioclimatique de la pessière à mousse
- La proximité du golfe du Saint-Laurent confère au climat une forte influence maritime
- Importantes précipitations et humidité élevée
- Grands incendies à très faible occurrence ~300 ans
- Végétation dominante: Épinette noire (*Picea mariana*), Sapin baumier (*Abies balsamea*), Bouleau blanc (*Betula papyrifera*), Aulne rugueux (*Alnus incana* ssp. *rugosa*), Aulne crispé (*Alnus alnobetula* ssp. *crispa*)

Résultats	Lac 6	Lac Rosette
ACM	Température : +1,5°C Feux: Faible fréquence, intensité et taille	
	Augmentation de l'épinette noire, du sapin baumier, l'aulne rugueux, bouleau	Dominance de l'épinette noire et du bouleau Augmentation du sapin baumier, pin blanc
PAG	Température : -2,2°C	
	Biomasse brûlée et taille de feu stables et peu fluctuantes Augmentation de la fréquence des feux	Augmentation de la biomasse brûlée, de la taille des feux, de la fréquence des feux
	Croissance du bouleau, sapin baumier, l'aulne rugueux Petite diminution de l'épinette noire, mais toujours dominante	Croissance de l'épinette noire, l'aulne crispé Diminution du sapin baumier et du bouleau
Réchauffement actuel	Augmentation de la température non significative, mais apparente dans la littérature scientifique	
	Augmentation de la fréquence des feux, diminution de la biomasse brûlée et de la taille des feux	Augmentation de la biomasse brûlée et de la taille des feux Diminution de la fréquence des feux
	Augmentation du bouleau, sapin baumier, l'aulne rugueux, pin blanc Diminution de l'épinette noire	Augmentation de l'épinette noire, mélèze laricin Diminution du bouleau, l'aulne crispé

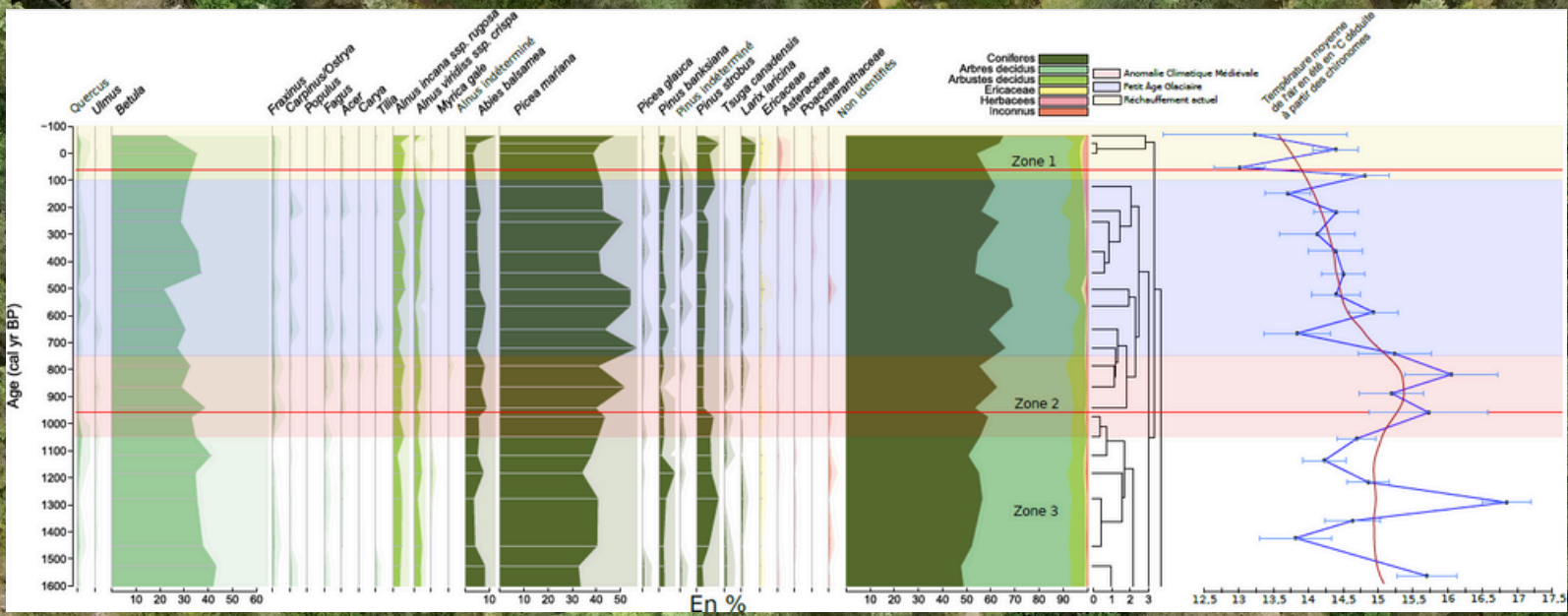


Diagramme pollinique du lac Rosette sur 1 600 cal. yrs BP, selon la température estivale de l'air déduite à partir des assemblages de chironomes, avec un lissage loess en rouge (pente= 0,25).

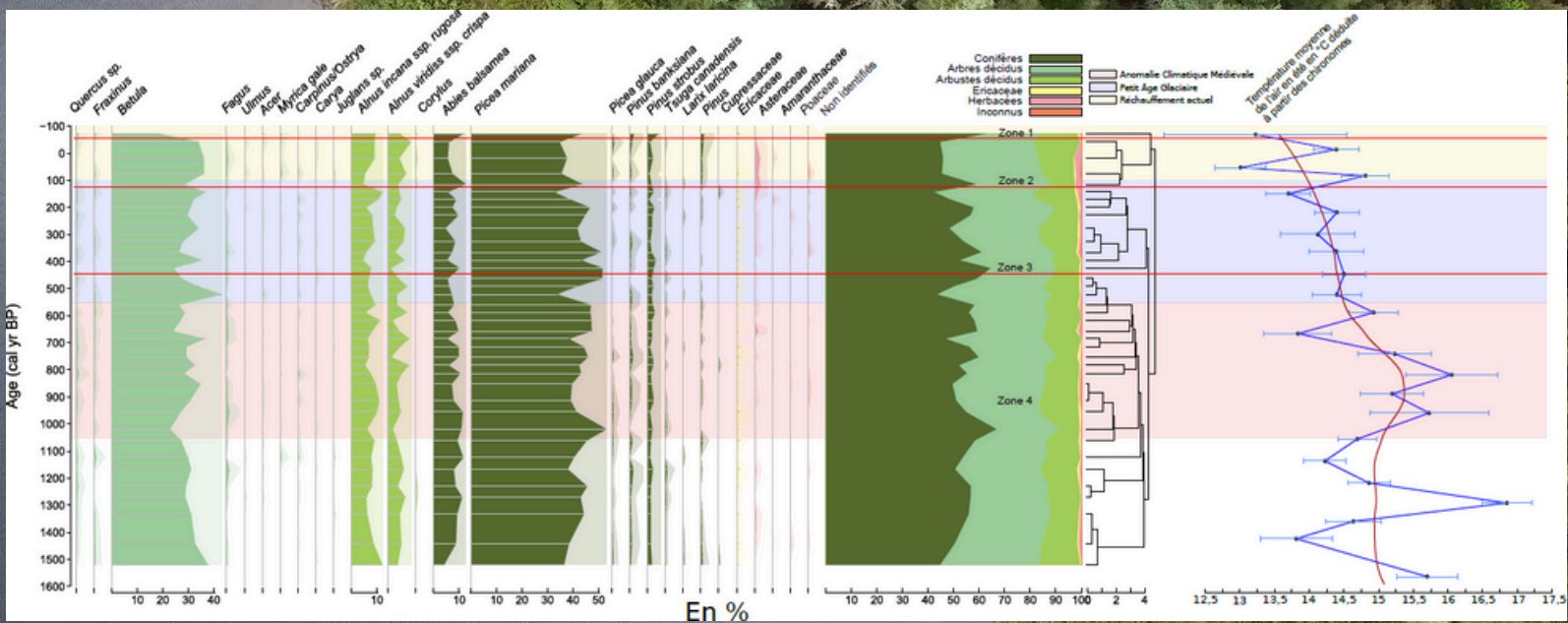
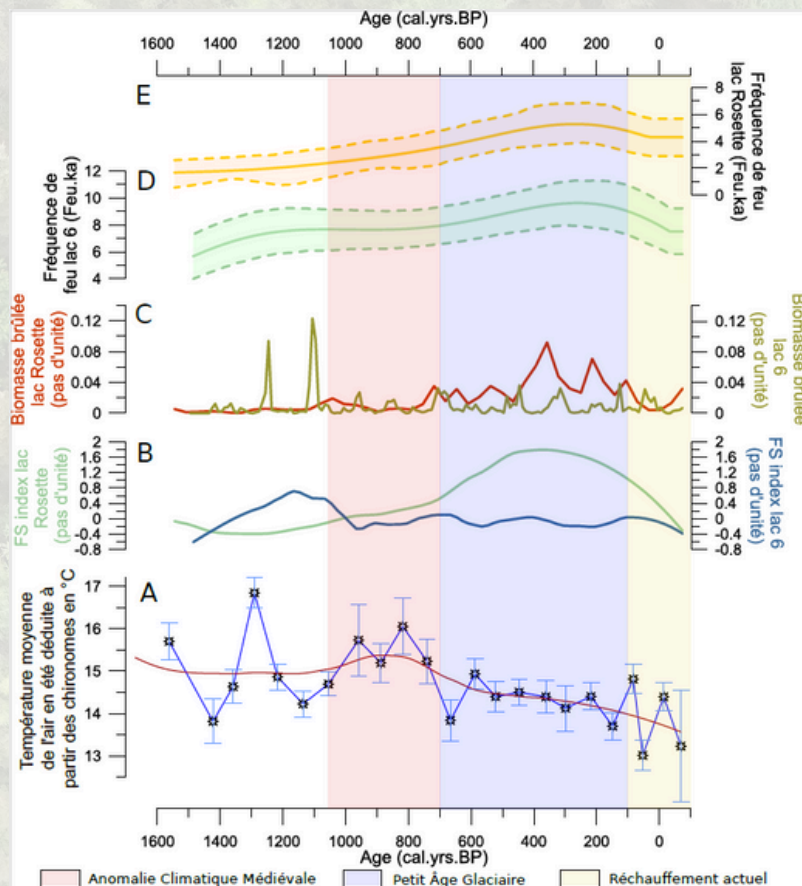


Diagramme pollinique du lac 6 sur 1 600 cal. yrs BP, selon la température estivale de l'air déduite à partir des assemblages de chironomes, avec un lissage loess en rouge (pente= 0,25).



Graphique des régimes de feu et variabilité climatique durant l'Holocène. A. Température moyenne de l'air en été en °C déduite à partir des chironomes; B. Taille de feux (FS index); C. Biomasse brûlée (BB); D. Fréquence de feu (FF) du lac 6; E. Fréquence de feu (FF) du lac Rosette.

Hypothèse 1:

Durant l'ACM, l'expansion des feuillus, en particulier du bouleau est peu remarquée avec la hausse des températures, combinée à une faible fréquence des feux

Durant le PAG, la fréquence accrue des incendies combinée à des températures plus basses favorise la coniférisation du milieu, marquée par un fort développement de l'épinette noire.

Hypothèse 2:

Lac 6:

Au XX^e siècle, des conditions plus humides ont réduit la taille et la biomasse des incendies, tout en maintenant une forte fréquence de feux, ce qui a favorisé l'implantation de feuillus intolérants aux incendies sévères;

Lac Rosette:

Moins soumis à l'influence humide du golfe du Saint-Laurent, il connaît des feux plus intenses mais moins fréquents, favorisant l'épinette noire, espèce tolérante au feu.

Hypothèse 3:

Une forte humidité, comme au lac 6, entraîne de petits feux fréquents, favorisant les espèces peu tolérantes aux incendies de grande ampleur.