



Dynamique holocène d'une sapinière à bouleau à papier du domaine de la Pessière à mousses de l'Ouest du Québec

Mémoire

Joanie Tremblay

Maîtrise en sciences géographiques
Maître en sciences géographiques (M.Sc. Géogr.)

© Joanie Tremblay, 2017

Dynamique holocène d'une sapinière à bouleau à papier du domaine de la Pessière à mousses de l'Ouest du Québec

Mémoire

Joanie Tremblay

Sous la direction de :

Martin Lavoie, directeur de recherche

Serge Payette, codirecteur de recherche

Résumé

Dans le domaine bioclimatique de la Pessière à mousses de l'Ouest au Québec, le feu est la principale perturbation écologique naturelle régissant la dynamique du couvert forestier. Bien que le sapin baumier (*Abies balsamea*) soit une espèce moins bien adaptée à cette perturbation, on y trouve néanmoins de petites sapinières, souvent cantonnées à des versants de collines qui agissent parfois comme des barrières topographiques contre la propagation du feu. L'objectif principal du présent mémoire était de reconstituer l'histoire postglaciaire de la végétation et des feux d'une station occupée par une sapinière à bouleau à papier située au sein de la portion centrale de la Pessière à mousses de l'Ouest. Afin de répondre à cet objectif, des analyses polliniques, macrofossiles et anthracologiques d'une carotte sédimentaire prélevée à la bordure d'une tourbière au contact de la sapinière furent effectuées. L'histoire de la végétation a débuté il y a environ 8900 ans A.A. par la formation d'une pessière. De nombreux charbons bois témoignent que les feux étaient alors fréquents. Le sapin baumier s'est installé localement il y a environ 7350 ans A.A., et sa représentation pollinique fut maximale jusque vers 5550 ans A.A. Des feux sont survenus durant cette période, mais la quantité de charbon dans les sédiments était nettement moins élevée que précédemment. La représentation pollinique du sapin a ensuite diminué mais elle est demeurée stable jusqu'à nos jours lors d'une recrudescence de feux. Les résultats suggèrent que la sapinière à bouleau à papier s'est maintenue localement depuis plus de 7000 ans A.A. et ce, malgré l'occurrence de plusieurs feux. Les feux survenus lors du maximum d'abondance du sapin baumier étaient probablement moins fréquents et moins sévères que ceux de l'Holocène supérieur. La sapinière se serait donc maintenue localement pendant plusieurs millénaires malgré le fait qu'elle a évolué dans un environnement de feu.

Table des matières

Résumé	iii
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux	vi
Remerciements	vii
1. Introduction	1
1.1 Histoire postglaciaire de la forêt boréale du centre du Québec	3
1.2 Objectifs et hypothèses du projet.....	5
2. Région et site à l'étude	7
2.1 Région à l'étude	7
2.2 Site à l'étude	9
3. Méthodes	12
3.1 Choix du site à l'étude	12
3.2 Travaux d'échantillonnage.....	12
3.3 Travaux en laboratoire	15
3.3.1 Analyse sporopollinique.....	15
3.3.2 Analyses macrofossile et anthracologique	16
3.4 Datations au radiocarbone.....	17
3.5 Contenu en matière organique	18
4. Résultats	19
4.1 Stratigraphie et chronologie de la carotte sédimentaire.....	19
4.2 Données polliniques et macrofossiles	25
4.3 Données anthracologiques	32
5. Discussion.....	36
5.1 Histoire holocène de la végétation et des feux	36
6. Conclusion	41
7. Références	43

Liste des figures

Figure 1:	Principales formations végétales du Québec (MFFP, 2016) et localisation du site à l'étude et des sites voisins pour lesquels des données paléocéologiques sont disponibles.....	1
Figure 2:	Carte de répartition des feux les plus récents ayant eu lieu dans la région immédiate du site d'étude (étoile). Source : Cartographie des feux, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec, mai 2016.....	8
Figure 3:	Localisation de la sapinière à bouleau à papier et du point d'échantillonnage.....	9
Figure 4:	Aperçu de la sapinière à bouleau à papier à l'étude. Photo : Joanie Tremblay	10
Figure 5:	Aperçu d'un arbre renversé. Photo : Joanie Tremblay.....	10
Figure 6:	Aperçu de la tourbière juxtaposée à la sapinière. Photo : Serge Payette	11
Figure 7:	Aperçu du point d'échantillonnage des sédiments organiques au sein de la tourbière à 10 m de la bordure forestière. Photo : Joanie Tremblay	13
Figure 8:	Vue en profondeur de l'échantillonnage des sédiments à l'aide du carottier Box.....	14
Figure 9:	Exemples de morceaux de bois et de charbons de bois trouvés dans la fosse d'excavation. A) bois à 90 cm de profondeur; B) bois à 110 cm de profondeur; C) fragments de bois à 130 cm de profondeur; D) charbons de bois à 100 cm de profondeur; E) rondelle provenant d'un tronc à 130 cm de profondeur; F) bois à 110 cm de profondeur. Photos : Joanie Tremblay	14
Figure 10:	Stratigraphie, contenu en matière organique et courbe âge-profondeur de la carotte sédimentaire de la tourbière Ignis. ...	21
Figure 11:	Composition botanique de la matrice de la tourbe (0-146 cm) de la carotte sédimentaire.....	22
Figure 12:	Diagramme pollinique en pourcentage du site Ignis.....	29
Figure 13:	Diagramme d'influx polliniques (grains $\text{cm}^{-2} \text{an}^{-1}$) du site Ignis.....	30
Figure 14:	Diagramme macrofossile du site Ignis.....	31
Figure 15:	Diagramme anthracologique de la carotte sédimentaire de la tourbière Ignis.	34

Liste des tableaux

Tableau I: Données chronologiques du site Ignis.	23
Tableau II: Identification botanique des pièces de bois trouvées dans la fosse d'excavation du profil sédimentaire de la tourbière <i>Ignis</i>	24
Tableau III: Identification botanique des charbons de bois de taille supérieure à 2 mm trouvés dans la carotte sédimentaire du site <i>Ignis</i>	35

Remerciements

Je tiens tout particulièrement à remercier mon directeur de maîtrise, M. Martin Lavoie, pour son soutien, sa disponibilité, et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Je tiens également à remercier mon co-directeur M. Serge Payette pour son soutien, sa grande disponibilité mais surtout pour son enthousiasme scientifique qu'il a su si bien me partager. Vous avez su me transmettre votre passion pour la recherche tout en me fournissant un encadrement de qualité.

J'aimerais également remercier Mme. Najat Bhiry, professeure au Département de géographie, pour avoir accepté de faire partie de mon comité d'encadrement et de m'avoir donné des recommandations très utiles au projet.

J'aimerais aussi remercier M. Pierre-Luc Couillard, Mme Myosotis Bourgon Desroches, M. Mathieu Frégeau, M. Benoit Fillion, M. Jason Laflamme, Mme Élisabeth Robert, Mme Ann Delwaide, Mme Vanessa Pilon, M. Donald Cayer et M. Guillaume Labrecque pour leur précieuse aide, autant sur le terrain qu'en laboratoire. Finalement, je remercie ma famille pour leur support moral incroyable tout au long de ma maîtrise.

La réalisation de ce mémoire a été rendue possible grâce au soutien financier du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP).

1. Introduction

Au Québec, le domaine bioclimatique de la Pessière noire à mousses forme une bande d'environ 300 km de largeur entre les latitudes 49° et 52° N, de l'Abitibi à l'ouest au Labrador à l'est (**Figure 1**). D'une superficie de 412 400 km², il s'agit du plus vaste domaine bioclimatique du Québec (Saucier et al., 2009).

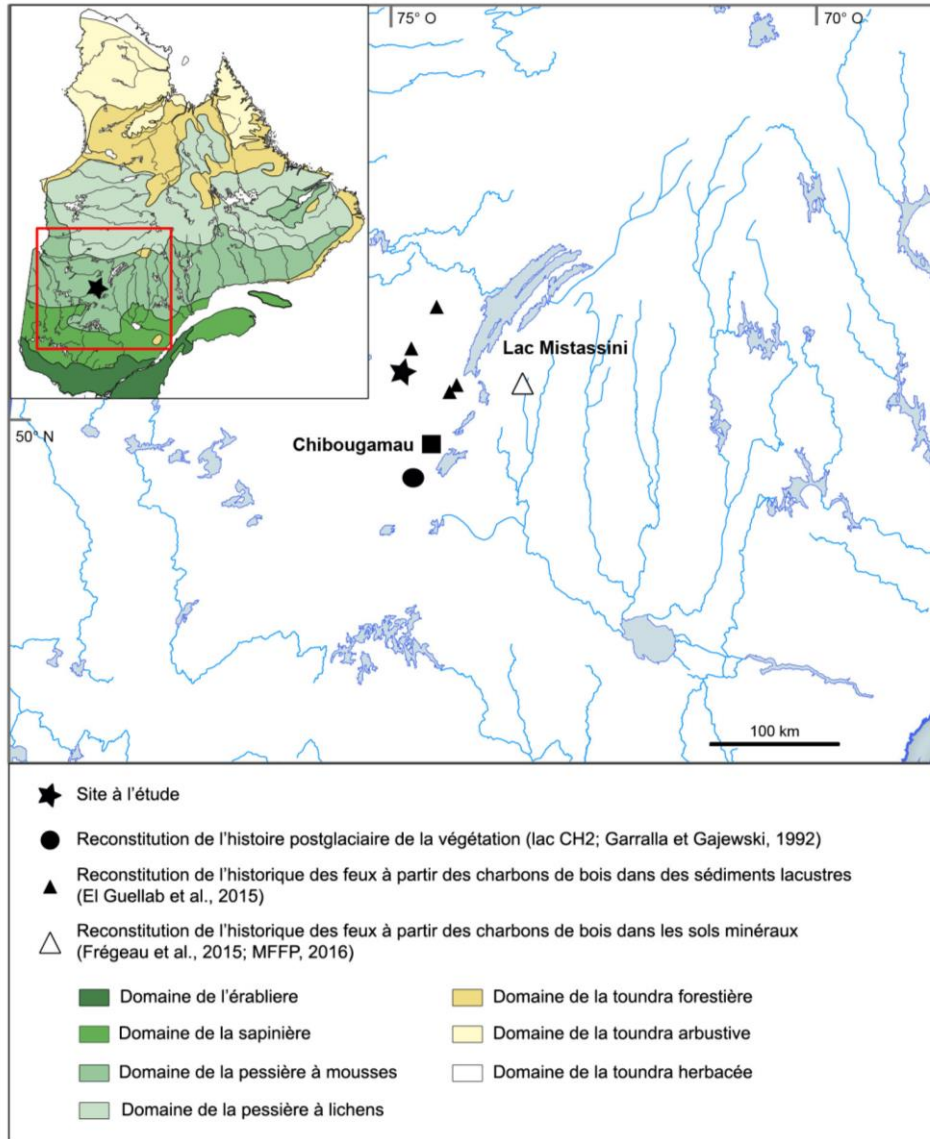


Figure 1: Principales formations végétales du Québec (MFFP, 2016) et localisation du site à l'étude et des sites voisins pour lesquels des données paléocologiques sont disponibles.

En fonction du climat, des perturbations écologiques naturelles (feux, épidémies d'insectes défoliateurs) et des caractéristiques physiques du milieu (p. ex. : topographie, dépôts de surface), la Pessière noire à mousses se subdivise en deux sous-domaines (est et ouest). La Pessière à mousses de l'Ouest est délimitée à l'ouest par la frontière ontarienne et à l'est par le bassin versant des rivières Péribonka et Manouane. Elle est caractérisée par un relief moins accidenté et par un climat moins humide que dans la partie Est. Les précipitations annuelles, de l'ordre d'environ 700 mm comparativement à 1000 mm dans la partie Est, font en sorte que le feu y est la principale perturbation naturelle (Bergeron et al., 2001). Le couvert forestier est dominé par des espèces qui se régénèrent bien après feu comme l'épinette noire (*Picea mariana* (Miller) Britton, Sterns & Poggenburgh) et le pin gris (*Pinus banksiana* Lambert). Celles-ci sont pourvues de cônes semi-sérotineux (épinette noire) et sérotineux (pin gris) qui s'ouvrent et libèrent leurs graines sous l'effet de la chaleur du feu (Gagnon et Morin, 2001). En revanche, ce sont les épidémies d'insectes défoliateurs qui prévalent dans la Pessière à mousses de l'Est, notamment celles de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clem.) (Morin et Laprise, 1990; Tremblay et al., 2012). La fréquence des feux y est moins élevée que dans l'ouest (Bouchard et al., 2008) et le sapin baumier (*Abies balsamea* (Linnaeus) Miller) est plus abondant. Lorsqu'ils surviennent, les feux peuvent couvrir de vastes étendues, à l'instar par exemple de celui survenu en 2013 dans le secteur du village de Baie Johan-Beetz sur la moyenne Côte-Nord.

Bien que le sapin baumier soit une espèce moins bien adaptée au feu, on trouve néanmoins dans la Pessière à mousses de l'Ouest plusieurs sapinières. Elles sont souvent cantonnées à des versants de collines qui agissent comme des barrières topographiques contre la propagation du feu, de sorte qu'une sapinière peut échapper à l'action du feu pendant une longue période de temps. Par exemple, dans la forêt mixte de l'ouest du Québec, des études écologiques et paléoécologiques ont permis d'identifier des « refuges », c'est-à-dire des îlots forestiers résiduels (Ouarmim et al., 2014a). Les refuges seraient moins susceptibles au feu en raison de caractéristiques locales comme la topographie, l'humidité du substrat, l'épaisseur de la couche de matière organique au sol ou encore la qualité du combustible.

Ces refuges pourraient ainsi se maintenir pendant plusieurs siècles, voire plusieurs millénaires, n'étant affectés que par les feux les plus sévères et couvrant de vastes superficies. Les îlots forestiers résiduels se distinguent des îlots transitoires qui, eux, ont échappé seulement au dernier feu (Ouarmim et al., 2014b).

1.1 Histoire postglaciaire de la forêt boréale du centre du Québec

La reconstitution de l'histoire postglaciaire de la végétation de la partie centrale du Québec occupée aujourd'hui par le domaine bioclimatique de la Pessière à mousses a fait l'objet de peu d'études à ce jour comparativement aux secteurs plus à l'ouest comme l'Abitibi et l'est ontarien (Liu, 1990; Anderson, 1995; Carcaillet et al., 2001; 2010; Asselin et al., 2016; Fréchette et al., 2017). L'une des premières études a consisté en la confection d'un diagramme pollinique d'une tourbière dans la région du lac Mistassini (Ignatus, 1956, cité par Richard et al., 1982). Il s'agissait d'un diagramme à faible résolution stratigraphique et temporelle qui ne comportait aucune date ^{14}C . Plus récemment, Garralla et Gajewski (1992) ont reconstitué l'histoire de la végétation de la région de Chibougamau à l'aide de l'analyse pollinique des sédiments d'un lac (CH2) (**Figure 1**). Quatre périodes principales auraient marqué l'histoire de la végétation depuis environ 8400 ans A.A. (années étalonnées avant aujourd'hui). La première période (avant ca 8400 ans) est celle de l'amorce de la colonisation végétale suite à la déglaciation. La présence d'espèces héliophiles et fixatrices d'azote comme l'aulne crispé (*Alnus alnobetula* subsp. *crispa* (Aiton) Raus et la shépherdie du Canada (*Shepherdia canadensis* (Linnaeus) Nuttall) suggère un paysage végétal d'abord à dominance arbustive, bien que des arbres comme le mélèze (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch) et le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michaux) était déjà présents. La deuxième période (ca 8400 à 5400 ans A.A.) fut marquée par une densification du couvert forestier. Elle se caractérise notamment par la présence de l'épinette (probablement l'épinette noire) et du bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marshall). Garralla et Gajewski (1992) suggèrent que les forêts étaient alors ouvertes puisque les valeurs des influx polliniques des espèces non arborescentes demeurent semblables à celles de la période précédente.

C'est durant la troisième période (ca. 5400 à 4200 ans A.A.) qu'aurait eu lieu la fermeture du couvert forestier d'après l'augmentation marquée des influx de l'épinette et du bouleau. La représentation pollinique du bouleau (bouleau à papier selon les macrorestes) était alors maximale. Enfin, la pessière à mousses telle que nous la connaissons aujourd'hui se serait constituée durant la quatrième et dernière période, il y a environ 4200 ans A.A. Les pourcentages et influx de l'épinette furent les plus élevés pour l'ensemble de la séquence postglaciaire, tandis que la représentation pollinique du bouleau a diminué considérablement. Depuis environ 1750 ans, on observe respectivement une chute et une augmentation de la représentation pollinique de l'épinette et du pin gris. Les pourcentages du sapin baumier furent toujours peu élevés (environ 1 %). Puisqu'il s'agit d'une espèce sous-représentée par le pollen (Richard, 1993), il est possible que sa représentation pollinique ait été en partie masquée par les forts pourcentages du bouleau et de l'épinette. Notons que les influx du sapin baumier sont toujours demeurés faibles, de sorte qu'il a sans doute été peu abondant dans la végétation avoisinant le lac CH2 (Fréchette et al., 2017).

Bien que l'on connaisse peu l'histoire de la végétation de la partie centrale du domaine de la pessière à mousses, Richard (1995) a suggéré qu'une pessière déjà fermée comportant une plus grande abondance de bouleau à papier devait occuper les régions sises de part et d'autre du lac Mistassini il y a 6800 ans, ce qui traduirait un climat alors plus chaud qu'aujourd'hui. Cette interprétation diffère de celle proposée par Garralla et Gajewski (1992) qui suggèrent une fermeture du couvert forestier aussi tardive que 5400 ans A.A. En ce qui concerne la représentation pollinique du sapin baumier dans les diagrammes polliniques de la forêt mixte, elle fut toujours relativement faible. Dans les analogues polliniques modernes des domaines bioclimatiques des sapinières, des pourcentages atteignant 10 sont considérés exceptionnels (Richard, 1993).

L'historique des feux de forêt pendant l'Holocène dans la portion centrale de la pessière à mousses demeure aussi grandement méconnu. Une reconstitution des feux survenus au cours des 7000 dernières années a été produite par l'entremise de l'analyse des charbons de bois de taille macroscopique préservés dans les sédiments de quatre lacs à l'ouest du lac Mistassini (**Figure 1**) (El Guellab et al., 2015). De façon générale, la période comprise

entre 7000 et 4000 ans A.A aurait été celle pendant laquelle les feux furent les plus fréquents (4-6 feux par millénaire). Une diminution de la fréquence serait ensuite survenue jusqu'à nos jours (3 feux par millénaire), à l'exception d'une période centrée vers 1000 ans A.A. (4 feux par millénaire). Une baisse de la fréquence des feux depuis 4000 ans aurait été associée à des conditions climatiques plus fraîches et plus humides. D'après des charbons de bois préservés dans les sols minéraux, Frégeau et al. (2015) ont montré qu'au sein de la pessière à mousses au nord du lac Saint-Jean (**Figure 1**), que les feux étaient présents depuis 8000 ans A.A., soit peu de temps après le retrait de l'inlandsis laurentidien. Le régime des feux et la composition des peuplements forestiers sont demeurés stables au cours des 5000 dernières années. La dynamique forestière observée actuellement aurait donc prévalu dans la région depuis les 5000 dernières années. Les endroits où l'intervalle de feux moyen est inférieur à 200 ans abritent des espèces adaptées aux feux comme le pin gris et l'épinette noire, alors que les espèces moins adaptées, comme le sapin baumier, sont confinées aux milieux où les feux sont moins fréquents.

1.2 Objectifs et hypothèses du projet

Cette étude a pour objectif principal de reconstituer l'histoire postglaciaire de la végétation et des feux d'une station occupée par une sapinière à bouleau à papier située au sein de la portion centrale du domaine bioclimatique de la Pessière à mousses de l'Ouest. Le sapin baumier est une espèce de fin de succession relativement peu adaptée au feu, dont l'abondance serait redevable à des feux peu fréquents ou peu sévères pendant une période de temps suffisamment longue. On propose l'hypothèse d'une abondance du sapin baumier variable selon le régime de feu, une forte abondance étant attribuable à des feux peu fréquents. Un changement au sein du régime des feux pourrait être responsable de la fragmentation et d'une moindre abondance du sapin baumier, menant à sa répartition actuelle dans la Pessière à mousses.

Afin de répondre aux objectifs du projet, l'échantillonnage d'une carotte sédimentaire a été mené dans une tourbière située au contact d'une sapinière à bouleau à papier afin de reconstituer, à l'aide d'indicateurs paléoécologiques, son histoire à des échelles spatiales locale et extra-locale. Trois principales techniques ont été employées, soit l'analyse sporopollinique, l'analyse macrofossile et l'analyse anthracologique. L'analyse pollinique consiste au dénombrement et à l'identification des grains de pollen et des spores contenus dans un échantillon ou une série d'échantillons de sol organique. Puisque les grains de pollen peuvent être transportés sur de grandes distances par le vent, notamment ceux des espèces anémophiles, l'analyse pollinique des sédiments lacustres et des tourbes livre d'abord une histoire de la végétation à une échelle spatiale régionale (plus de 500 mètres du milieu de dépôt) (Lavoie, 2001). C'est pourquoi l'échantillonnage de la bordure d'une tourbière au contact de la forêt a été privilégié afin de reconstituer une histoire locale et extra-locale de la végétation et des perturbations écologiques de la station occupée par la sapinière. L'analyse macrofossile concerne l'identification de pièces végétales (graines, bois, charbons de bois, etc.) préservées dans les sédiments. Contrairement aux grains de pollen, les macrorestes végétaux livrent avant tout une histoire locale de la végétation (Bhiry et Fillion, 2001). Enfin, afin de reconstituer l'histoire des feux de forêt, l'analyse anthracologique a été employée et comprend le dénombrement et l'identification botanique des charbons de bois préservés dans les sédiments. Les charbons de taille supérieure à 850 μm ne sont généralement pas transportés sur de longues distances par le vent; ils témoignent donc en principe de feux ayant eu lieu près du point d'échantillonnage (Ohlson et Tryterud, 2000; Payette et al., 2012).

2. Région et site à l'étude

2.1 Région à l'étude

Le site à l'étude se trouve à environ 80 km au nord de la ville de Chibougamau. Il se trouve dans la division physiographique de James, à la jonction des régions du Bas plateau d'Abitibi, des Basses-Terres d'Eastmain et des Collines de Mistassini (Prichonnet et al., 1984). Le retrait des glaces a eu lieu dans la région il y a environ 8900 ans A.A. (Dyke, 2004). Elle a par la suite été recouverte par le lac proglaciaire Barlow-Ojibway qui s'est progressivement retiré pendant un millénaire (Dyke et al., 2003). Les datations radiométriques de la base de carottes sédimentaires lacustres au sud (lac CH2; Garralla et Gajewski, 1992) et au nord (lac Nans; El Guellab et al., 2015) de Chibougamau ont respectivement livré des âges de 8470 et 8500 ans A.A. Les dépôts de surface comprennent principalement du till et des sédiments fluvio-glaciaires composés de sables et graviers stratifiés, de cailloux et de blocs. Ils se présentent généralement sous la forme de moraines, d'eskers, de kames et de plaines d'épandage (Prichonnet et al., 1984).

Le climat est de type continental, caractérisé par des hivers froids et longs et des étés courts. La température moyenne du mois le plus chaud (juillet) est de 16,1°C et celle du mois le plus froid (janvier) de -19,4°C. Les précipitations moyennes annuelles varient de 700 à 900 mm, dont 35 % tombent sous forme de neige. La saison de croissance est relativement courte, soit de 140 à 150 jours (Environnement Canada, 2014).

L'épinette noire est l'espèce arborescente dominante. Elle forme généralement des peuplements purs ou mixtes en compagnie du pin gris, de l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss.), du sapin baumier et du bouleau à papier. Le mélèze laricin est présent sur les stations plus humides, en bordure des lacs et des cours d'eau de même qu'au sein des tourbières (Morneau, 2009). Le feu est la principale perturbation écologique naturelle. L'intervalle des feux est relativement court (moins de 150 ans; Morneau, 2009). Des feux survenus au cours des décennies 1850-1860, 1910-1940 et 1980-1990 ont affecté le couvert forestier de la région (Le Goff et al., 2007). Le feu le plus récent s'est produit dans la région immédiate de Chibougamau en 2005 (**Figure 2**).

Depuis la fin du XIX^e siècle, les perturbations d'origine anthropique, comme les coupes forestières et les activités minières, ont gagné en importance.

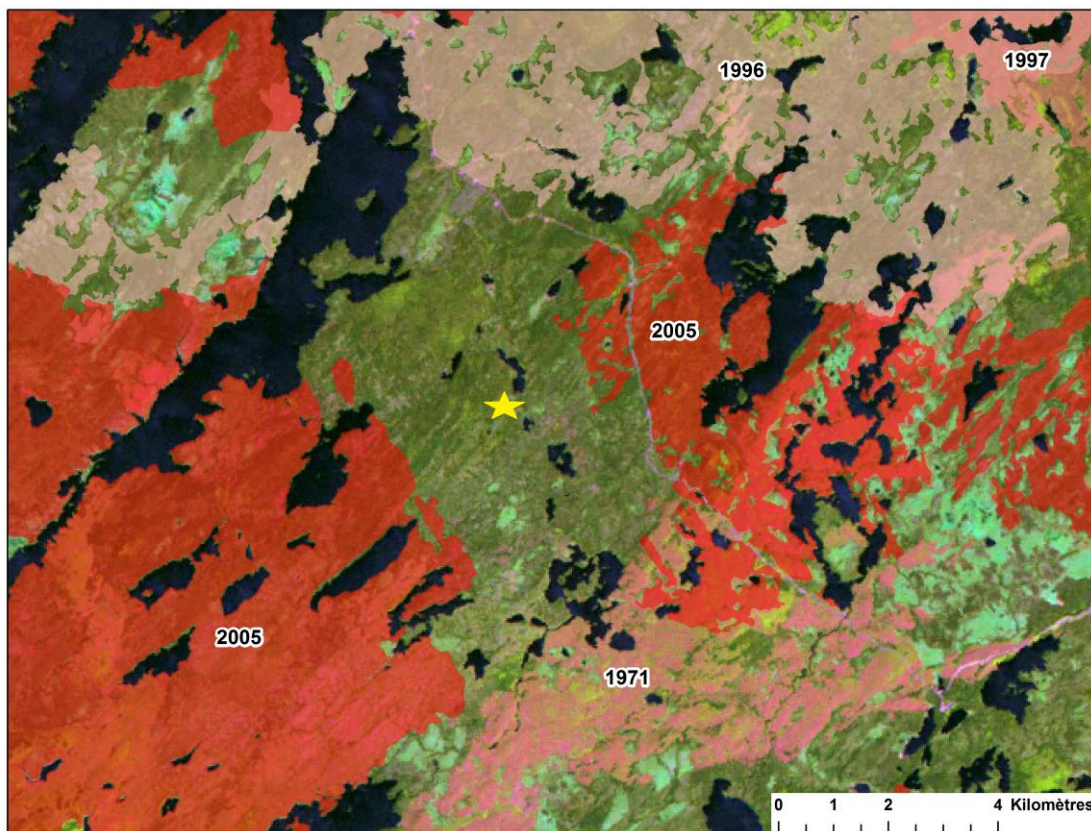
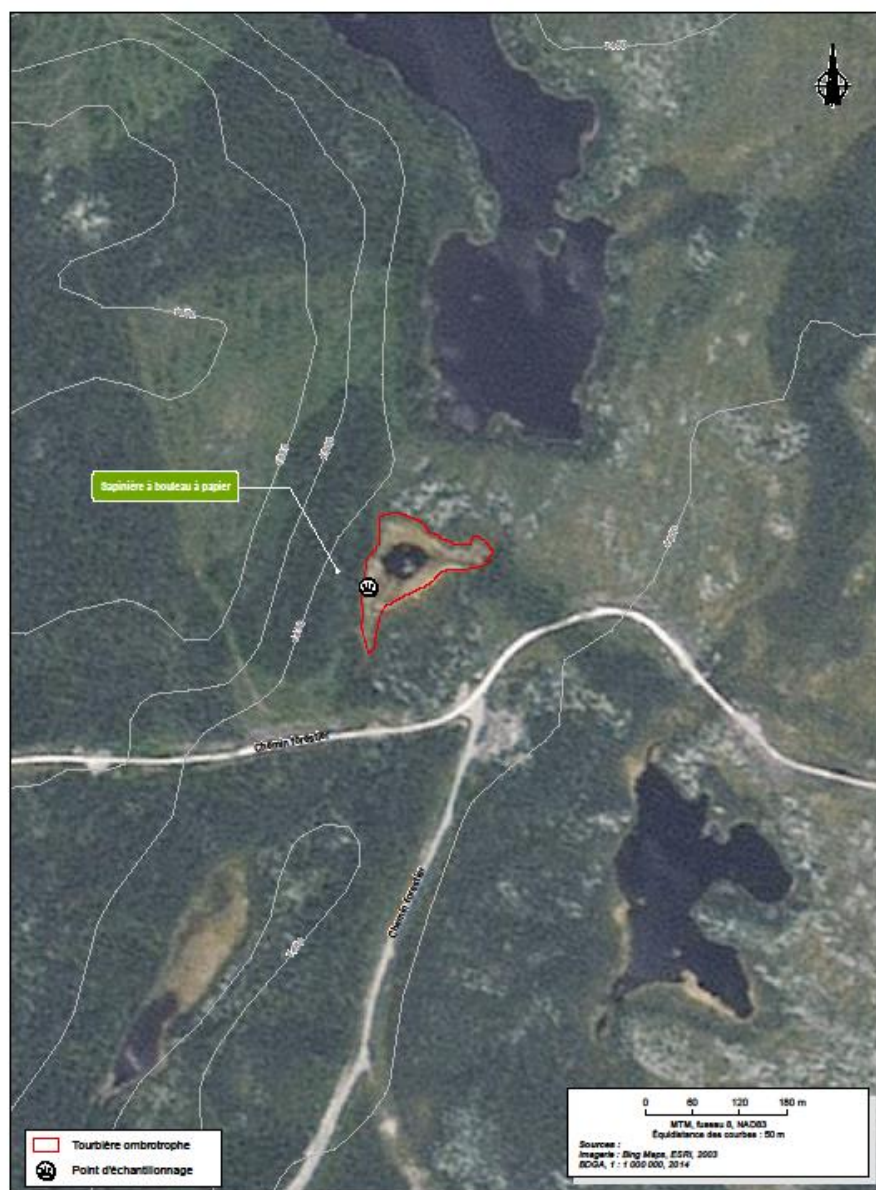


Figure 2: Carte de répartition des feux les plus récents ayant eu lieu dans la région immédiate du site d'étude (étoile). Source : Cartographie des feux, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec, mai 2016

2.2 Site à l'étude

Le site à l'étude (Ignis; nom non officiel) consiste en une sapinière à bouleau à papier d'une superficie de 6 ha située sur un versant de colline à une altitude de 441 m (50°37'36.21''N; 74°42'26.737''O) (Figure 3).



Le peuplement est composé majoritairement de sapin baumier, de bouleau à papier et d'épinette noire (**Figure 4**). La strate arbustive est principalement dominée par des éricacées, notamment *Vaccinium angustifolium* Aiton et *Gaultheria hispidula* (Linnaeus) Muhlenberg ex Bigelow, alors que les principales espèces de la strate herbacée sont *Cornus canadensis* Linnaeus, *Coptis trifolia* (Linnaeus) Salisbury, *Clintonia borealis* (Aiton) Rafinesque, *Lysimachia borealis* (Rafinesque) U. Manns et Anderberg et *Maianthemum canadense* Desfontaines. On dénombre plusieurs bouleaux à papier morts et de nombreux arbres renversés (**Figure 5**).



Figure 4: Aperçu de la sapinière à bouleau à papier à l'étude. Photo : Joanie Tremblay



Figure 5: Aperçu d'un arbre renversé. Photo : Joanie Tremblay

Une tourbière ombrotrophe non forestière d'une superficie de 15 ha (altitude : 438 m) jouxte la sapinière (**Figure 6**). Son cortège floristique est composé entre autres d'éricacées (*Rhododendron groenlandicum* (Oeder) Kron et Judd, *Vaccinium angustifolium*, *Kalmia angustifolia* Linnaeus, *Kalmia polifolia* Wangenheim) sur un tapis de sphaignes. Quelques rares épinettes noires arbustives sont présentes. La tourbière est traversée par de petits ruisseaux. Elle correspond à un ancien lac dont le comblement n'est pas encore terminé.



Figure 6: Aperçu de la tourbière juxtaposée à la sapinière. Photo : Serge Payette

3. Méthodes

3.1 Choix du site à l'étude

Aux fins de l'étude, plusieurs sapinières ont tout d'abord été repérées par l'intermédiaire de cartes écoforestières. Elles ont été choisies en fonction de la composition du peuplement, des possibilités d'accès et de la présence d'une tourbière à proximité pour mener des analyses paléoécologiques. L'épaisseur de la matière organique de la tourbière près de la bordure forestière fut aussi un critère de sélection à considérer, car en général, plus elle renferme un dépôt de tourbe épais, plus elle est susceptible de représenter une longue séquence temporelle. Il devait donc y avoir une épaisseur de sédiment suffisamment importante près de la bordure afin de maximiser les chances d'obtenir un signal paléoécologique de l'îlot de sapinière. Le secteur immédiat du site devait aussi être exempt de perturbations anthropiques comme, par exemple, de la coupe forestière. Tous les sites d'étude potentiels retenus selon ces critères ont été visités et évalués au mois de juin 2014.

3.2 Travaux d'échantillonnage

Les travaux d'échantillonnage à la tourbière se sont déroulés au mois d'octobre 2014. Le point de récolte de la carotte sédimentaire est situé à une distance de 10 m de la lisière forestière (**Figure 7**). Il a été choisi en vue de maximiser l'enregistrement des apports polliniques locaux et extra-locaux et des charbons de bois issus de feux ayant eu lieu dans le site de la sapinière, tout en tentant d'obtenir la plus longue séquence temporelle possible.



Figure 7: Aperçu du point d'échantillonnage des sédiments organiques au sein de la tourbière à 10 m de la bordure forestière. Photo : Joanie Tremblay

L'épaisseur de la matière organique au point d'échantillonnage, mesurée à l'aide d'une tige, était de 242 cm. Une fosse d'excavation a d'abord été dégagée à la tronçonneuse (**Figure 7**) et à la pelle jusqu'à une profondeur de 160 cm. Dans cette fosse, la tourbe fut récoltée à partir de la surface sous la forme de monolithes (20 × 20 × 20 cm). Un carottier Box (105 × 8 × 8 cm; Jeglum et al., 1992) fut ensuite utilisé pour récolter les sédiments plus profonds (160 à 242 cm de profondeur) jusqu'au contact du dépôt d'argile (**Figure 8**). Les sédiments organiques ont été enveloppés dans une pellicule plastique et du papier d'aluminium pour leur transport au laboratoire. À différents niveaux de la fosse d'excavation, des cônes, des charbons de bois et des morceaux de bois ont été récoltés. Une rondelle a été prélevée chez les plus grandes pièces de bois à des fins d'identification botanique (**Figure 9**).



Figure 8: Vue en profondeur de l'échantillonnage des sédiments à l'aide du carottier Box.



Figure 9: Exemples de morceaux de bois et de charbons de bois trouvés dans la fosse d'excavation. A) bois à 90 cm de profondeur; B) bois à 110 cm de profondeur; C) fragments de bois à 130 cm de profondeur; D) charbons de bois à 100 cm de profondeur; E) rondelle provenant d'un tronc à 130 cm de profondeur; F) bois à 110 cm de profondeur. Photos : Joanie Tremblay

3.3 Travaux en laboratoire

En laboratoire, les sédiments ont été découpés en tranches contigües de 1 cm d'épaisseur. Ils ont été nettoyés (élimination d'une couche superficielle de quelques millimètres d'épaisseur) afin d'éviter toute contamination par de la matière organique contemporaine ayant pu survenir lors de l'échantillonnage sur le terrain.

3.3.1 Analyse sporopollinique

À tous les 4 cm d'intervalle, un sous-échantillon d'un volume de 1 à 3 cm³ (selon les niveaux) a été prélevé au centre de chacune des tranches préalablement découpées à l'aide d'un emporte-pièce. Chaque échantillon a été traité chimiquement afin d'éliminer la matière organique et la matière minérale pour ne conserver que les grains de pollen et les spores. Le protocole utilisé fut celui de Faegri et Iversen (1989). Lors des traitements chimiques, deux capsules d'un marqueur pollinique exotique (*Lycopodium*) de concentration connue ont été ajoutées à chacun des sous-échantillons afin de calculer les concentrations polliniques (grains cm⁻³) et les influx polliniques (grains cm⁻² an⁻¹).

L'identification et le dénombrement des grains de pollen et des spores ont été effectués à l'aide d'un microscope optique à un grossissement de 400×. Un minimum de 500 grains de pollen de plantes vasculaires terricoles (somme pollinique) a été dénombré à chaque niveau pour le calcul des pourcentages polliniques. Les grains de pollen des éricacées et des cypéracées ont toutefois été exclus de la somme pollinique, car ils représentent essentiellement des apports en provenance de la tourbière pouvant masquer la représentation pollinique des autres espèces. L'identification des grains de pollen a été réalisée à l'aide d'atlas polliniques (Richard, 1970; McAndrews et al., 1973) et de la collection de référence du Laboratoire de paléoécologie terrestre du Centre d'études nordiques (CEN). Les résultats sont présentés sous la forme d'un diagramme pollinique des pourcentages. Dans celui-ci, seules les courbes polliniques des taxons dont la représentation atteint 1 % au moins une fois sont illustrées. Les autres taxons ont été regroupés au sein de courbes nommées « Autres arbres », « Autres arbustes » et « Autres herbes ».

Afin de ne pas surcharger le diagramme, les courbes des espèces sporifères (p. ex. : sphaignes, fougères, lycopodes) ne sont pas présentées. Le diagramme a été subdivisé en zones d'assemblages polliniques sur la base des courbes polliniques des taxons polliniques les plus abondants. Des influx polliniques (ou taux d'accumulation pollinique) ont aussi été calculés chez quelques taxons (*Picea*, *Abies balsamea*, *Pinus banksiana*, *Betula*) dans le but d'obtenir un aperçu plus juste de leur dynamique à long terme.

3.3.2 Analyses macrofossile et anthracologique

L'analyse macrofossile a été effectuée tous les 2 cm d'intervalle à partir d'un sous-échantillon d'un volume de 20 cm³. La matière organique a d'abord été portée à ébullition pendant quelques minutes dans une solution d'hydroxyde de potassium (KOH) 5 % afin de disperser les agrégats et de faciliter l'étape suivante du tamisage. Celui-ci s'est fait à l'aide de trois tamis superposés de maille de 2 mm, 850 µm et 425 µm (Bhiry et Filion, 2001). Les pièces ont été identifiées et dénombrées à l'aide d'une loupe binoculaire à un grossissement de 40×. Les aiguilles d'épinettes et les bryophytes (sphaignes, mousses brunes) n'ont pas été identifiées à l'espèce. La représentation des principales composantes de la matrice de la tourbe (bryophytes, racines et radicelles, fragments ligneux, fragments de plantes herbacées, fragments de feuilles) a été estimée en pourcentage de la composition de la matrice. L'identification des pièces a été réalisée à l'aide de guides de références (Montgomery, 1977; Lévesque et al., 1988) et de la collection de pièces macrofossiles du Laboratoire de paléoécologie terrestre du CEN. Les résultats sont présentés sous la forme de dénombrements (nombre de pièces/20 cm³). Afin de simplifier la description de l'histoire de la végétation, les zones d'assemblages polliniques ont été reportées sur le diagramme macrofossile. Toutes les pièces de bois prélevées dans la fosse d'excavation lors de l'extraction des monolithes sur le terrain ont été identifiées au microscope à lumière incidente à des grossissements de 200 et 500×, au niveau du genre ou de l'espèce à partir de critères anatomiques du bois (Jacquiot, 1955; Schweingruber, 1990) et de la collection de pièces macrofossiles.

Afin de reconstituer l'histoire des feux ayant eu lieu dans le site de la sapinière, les charbons de bois de taille supérieure à 850 μm ont été extraits des mêmes échantillons que ceux traités pour l'analyse macrofossile. Ils ont été séchés pendant 24 heures puis pesés. Au total, 90 charbons de bois de taille supérieure à 2 mm ont fait l'objet d'une identification botanique à partir des critères anatomiques du bois (Panshin et de Zeeuw, 1980). Les résultats sont exprimés sous la forme de concentrations (nombre de charbons/20 cm^3) et ce, séparément pour les pièces de taille supérieure à 2 mm et celles dont la taille est comprise entre 850 μm et 2 mm. Enfin, l'anthracomasse des charbons de taille supérieure à 2 mm a été calculée ($\text{mg}/20 \text{ cm}^3$).

3.4 Datations au radiocarbone

Huit datations au radiocarbone (^{14}C) par spectrométrie de masse par accélérateur (SMA) ont été effectuées au Laboratoire de radiochronologie du CEN (préparation des échantillons) et au Keck Laboratory de l'Université de Californie à Irvine (datation). Sept des huit échantillons datés consistaient en de la tourbe ou de la gyttja en vrac (volume d'environ 1 cm^3 et d'un poids de quelques milligrammes) et le dernier en des macrorestes végétaux (graines d'éricacées). Les âges obtenus en années conventionnelles (années ^{14}C) ont été transformés en années étalonnées avant aujourd'hui (années A.A. ; ± 2 écarts-types) à l'aide du logiciel CALIB 7.0.4 et de la base de données INTCAL 09 (Reimer et al., 2009). L'âge médian de la probabilité la plus élevée a été arrondi à la décennie près. Un modèle d'âge par interpolation linéaire a été employé pour calculer le rythme de l'accumulation verticale des sédiments (cm an^{-1}) et la période de temps représentée par un centimètre d'accumulation sédimentaire (ans cm^{-1}). Un âge actuel (0 ans A.A.) a été attribué à la surface de la tourbe (0 cm).

3.5 Contenu en matière organique

Le contenu en matière organique des sédiments a été déterminé à tous les 2 cm d'intervalle par la méthode de la perte au feu (Heiri et al., 2001) à partir d'un sous-échantillon d'un volume de 1 cm³. Les sédiments ont d'abord été pesés puis séchés à l'étuve pendant 24 heures à température de 100 °C ± 5 °C. Une fois secs, ils ont de nouveau été pesés et brûlés à 500 °C ± 5 C pendant 60 minutes. Les résultats sont exprimés en pourcentage de matière organique.

4. Résultats

4.1 Stratigraphie et chronologie de la carotte sédimentaire

La carotte échantillonnée est d'une épaisseur de 242 cm (**Figure 10**). Le dépôt organique repose sur des sédiments minéraux d'origine glaciolacustre mis en place lors de l'épisode du lac proglaciaire Ojibway-Barlow. La partie inférieure de la carotte est constituée de gyttja (242-146 cm), indiquant un stade initial lacustre. Elle est surmontée de tourbe jusqu'au sommet du dépôt (146-0 cm). La matrice de la tourbe (**Figure 11**) est essentiellement constituée d'herbacées et de bois entre 39 et 146 cm de profondeur, à l'exception de quelques niveaux où les mousses (99-215 cm) et les sphaignes (127-137 cm) sont abondantes. La portion supérieure de la tourbe (0-39 cm) est constituée de pièces de sphaignes peu décomposées correspondant à l'acrotelme de la tourbière. De nombreux restes ligneux sont aussi enfouis dans la gyttja. Le contenu en matière organique est généralement supérieur à 80 %, à l'exception de la partie inférieure de la gyttja (232-243 cm) où il est en moyenne de 71 % (**Figure 10**).

La chronologie de l'accumulation sédimentaire repose sur huit datations radiochronologiques (**Tableau I; Figure 10**). Le contact organo-minéral à la base du dépôt de gyttja (242 cm) a été daté à 8930 ans A.A., tandis qu'un âge de 5220 ans A.A. (146 cm) indique le début de l'accumulation de la tourbe au point d'échantillonnage. Aucune inversion chronologique n'a été observée, mais un âge « moderne » a été obtenu à 25 cm de profondeur au sein de l'acrotelme de la tourbière à partir de la datation de graines d'éricacées. La présence discrète, mais continue du pollen de l'herbe à poux (*Ambrosia*) à partir de 37 cm de profondeur (voir Section 4.4) est indicatrice d'activités anthropiques régionales. La ville de Chibougamau ayant été fondée en 1954, il est raisonnable d'attribuer un âge maximal d'environ 60 ans A.A. à ce niveau.

Le taux net (après décomposition) de l'accumulation sédimentaire verticale correspondant au dépôt de la gyttja (242-146 cm) a été constant, soit de $0,026 \text{ cm/an}^{-1}$ en moyenne (**Figure 10**). Il a par contre varié pendant l'accumulation de la tourbe ($0,011\text{-}0,529 \text{ cm an}^{-1}$). Une diminution importante de ce taux est observée entre les niveaux 75 et 50 cm (3620-1320 ans A.A.; $0,010 \text{ cm an}^{-1}$). Les valeurs les plus élevées caractérisent la partie supérieure de la carotte où la compaction et le degré de décomposition de la tourbe sont nettement moindres (acrotelme) comparativement à la partie inférieure.

Au moment de l'échantillonnage sur le terrain, 11 pièces de bois ont été récoltées à différentes profondeurs le long du profil sédimentaire (**Figure 9**). Leur bon état de conservation a permis de les identifier botaniquement (**Tableau II**). La mention «cf.» qui accompagne parfois le nom d'un taxon indique que la pièce ressemblait au matériel de la collection de référence. Dans la plupart des cas, il s'agissait de bois de conifère. Le bois de l'épinette et du mélèze laricin ainsi que celui du bouleau et de l'aulne ont été difficiles à distinguer en raison de leurs ressemblances anatomiques. C'est la raison pour laquelle une pièce donnée peut correspondre à plus d'un taxon possible.

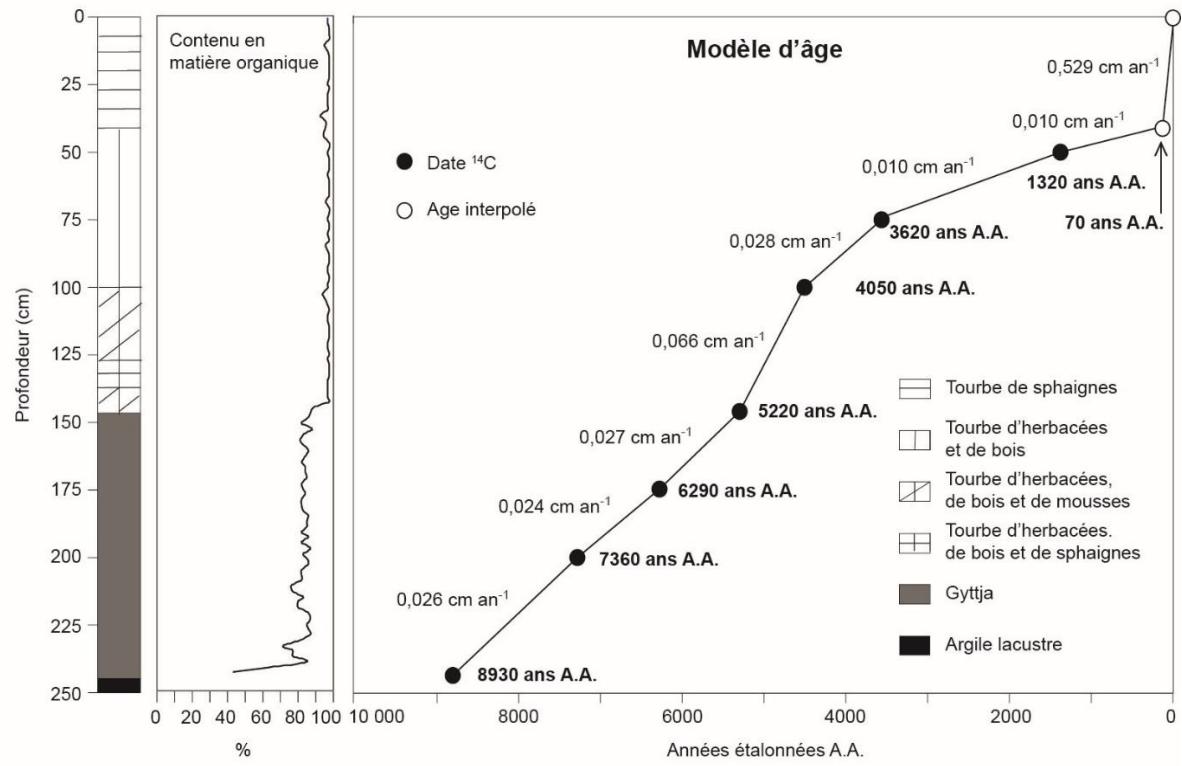


Figure 10: Stratigraphie, contenu en matière organique et courbe âge-profondeur de la carotte sédimentaire de la tourbière Ignis.

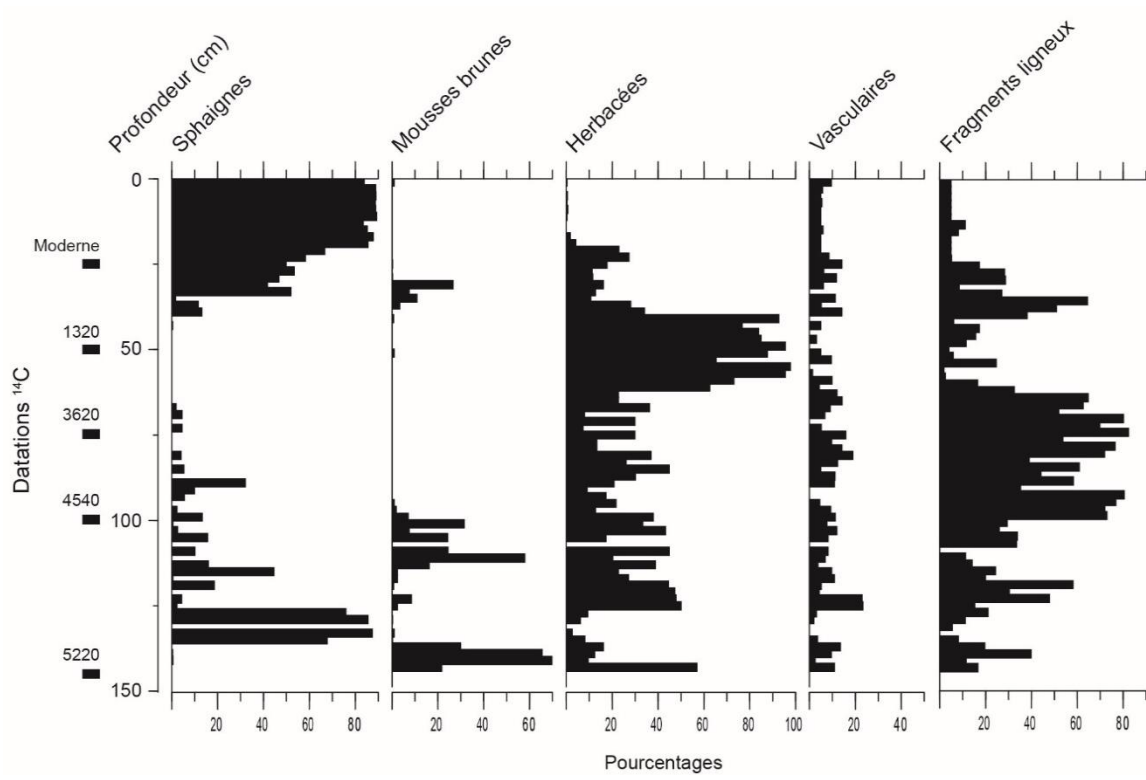


Figure 11: Composition botanique de la matrice de la tourbe (0-146 cm) de la carotte sédimentaire.

Tableau I: Données chronologiques du site Ignis.

Profondeur (cm)	Numéro de laboratoire	Matériel daté	Âge (années ¹⁴ C)	Années étalonnées (intervalle 2σ)	Années étalonnées (médiane)
24-25	UCIAMS-170183 ULA-5759	Graines	Moderne	Moderne	Moderne
50-51	UCIAMS-152885 ULA-5184	Tourbe	1415 ± 20	1294-1345	1320
74-75	UCIAMS-171034 ULA-5877	Tourbe	3395 ± 20	3586-3653	3620
100-101	UCIAMS-152886 ULA-5185	Tourbe	4050 ± 20	4498-4572	4540
145-146	UCIAMS-152887 ULA-5186	Tourbe	4470 ± 20	5162-5282	5220
174-175	UCIAMS-171035 ULA-5878	Gyttja	5480 ± 20	6273-6307	6290
200-201	UCIAMS-153876 ULA-5212	Gyttja	6480 ± 20	7327-7398	7360
241-242	UCIAMS-153875 ULA-5211	Gyttja	8005 ± 20	8855-8999	8930

Tableau II: Identification botanique des pièces de bois trouvées dans la fosse d'excavation du profil sédimentaire de la tourbière *Ignis*.

Profondeur (cm)	Identification
50	<i>cf Larix laricina</i>
50	<i>Picea sp. / Larix laricina</i>
60	Charbon de <i>Picea sp.</i>
65	<i>Picea sp.</i>
70	<i>Larix laricina / Picea sp.</i>
90	<i>Larix laricina / Picea sp.</i>
110	<i>Larix laricina / Picea sp.</i>
110	<i>Larix laricina / Picea sp.</i>
130	<i>Betula sp. / Alnus sp.</i>
130	<i>cf Larix laricina</i>
140	<i>Betula sp. / Alnus sp.</i>

4.2 Données polliniques et macrofossiles

Les analyses sporopolliniques et macrofossiles ont permis de reconnaître cinq périodes principales de l'histoire de la végétation de la station (Zones polliniques P-I à P-V). La Zone P-IV a été subdivisée en deux sous-zones (IVa et IVb). Au total, 48 taxons polliniques et 24 taxons macrofossiles ont été identifiés dans les assemblages sporopolliniques et macrofossiles. Les diagrammes de pourcentage et d'influx pollinique sont présentés aux Figures 12 et 13 et le diagramme macrofossile à la Figure 14.

Zone P-I (242-236 cm; ca 8930 – 8700 ans A.A.)

La Zone P-I, à la base de la carotte sédimentaire, correspond aux six premiers centimètres de l'accumulation de la gyttja. Au total, 31 taxons polliniques et 6 taxons macrofossiles ont été identifiés. La concentration pollinique moyenne est relativement élevée ($184\ 600\ \text{grains cm}^{-3}$). Dans cette zone de courte durée (environ 200 ans), le pourcentage moyen de pollen de bouleau (51 %), d'épinette (27 %) et de pin gris (8 %) est élevé. Le mélèze laricin (1 %) et le peuplier faux-tremble (2 %), deux espèces fortement sous-représentées par leur pollen, ont aussi été répertoriés. La présence de l'épinette et du mélèze à proximité du point d'échantillonnage est confirmée par des macrorestes d'aiguilles. Chez les arbustes, le saule (*Salix*; 1 %) y affiche sa représentation pollinique la plus élevée de l'ensemble du profil. Des graines de *Betulaceae* furent aussi identifiées. Chez les herbacées, le pourcentage de pollen de cypéracées est élevé (32 %) et quelques graines de *Carex* sp. ont été trouvées. Des restes de plantes aquatiques (*Najas flexilis* (Willdenow) Rostkovius & W.L.E. Schmidt, *Chara* sp., *Nitella* sp.) furent aussi répertoriés.

Zone P-II (236-200 cm; ca 8700- 7360 ans A.A.)

La Zone P-II est d'une durée approximative de 1350 ans. Au total, 33 taxons polliniques et 9 taxons macrofossiles ont été identifiés. La concentration pollinique moyenne est semblable à celle de la Zone I ($173\ 270\ \text{grains cm}^{-3}$).

Cette zone se caractérise principalement par une augmentation marquée du pourcentage de pollen d'épinette (37 % en moyenne) et de pin gris (12 %). Dans le cas du pin gris, l'influx pollinique augmente aussi dans la seconde moitié de la zone. Bien qu'élevée, la représentation du bouleau (pourcentage et influx) diminue graduellement vers le sommet de la zone (présence de quelques graines dans les assemblages macrofossiles). Des aiguilles d'épinette et de mélèze laricin attestent toujours de leur présence à proximité du lac de l'époque. Chez les arbres, le peuplier faux-tremble était aussi présent. Le sapin baumier atteint une représentation pollinique de 2 % chez les niveaux 220 et 228 cm. En raison de l'allure discontinue de la courbe pollinique, il s'agissait peut-être d'apports polliniques lointains, d'autant plus que les influx de la plante y étaient alors très faibles. Chez les arbustes, l'aulne rugueux (*Alnus incana* subsp. *rugosa* (Du Roi) R.T. Clausen) croissait en périphérie. La représentation pollinique des cypéracées est toujours très élevée et des restes de plantes aquatiques sont présents dans presque tous les niveaux analysés (*Chara* sp., *Nitella* sp., *Najas flexilis*).

Zone P-III (200-155 cm; ca 7360 – 5550 ans A.A.)

La Zone P-III, qui correspond à une période d'environ 1410 ans, est représentée par 35 taxons polliniques et 13 taxons macrofossiles. La concentration pollinique moyenne est plus élevée qu'antérieurement (250 600 grains cm⁻³). Elle se distingue par une augmentation marquée de la représentation pollinique du sapin baumier, autant des pourcentages (moyenne : 6 %) que des influx, ces derniers étant particulièrement élevés dans la seconde partie de la zone. C'est dans cette zone que les pourcentages les plus élevés du sapin baumier furent atteints (15 %). La représentation pollinique de l'espèce est appuyée par la présence d'aiguilles et de graines. Chez les autres espèces arborescentes, l'épinette (moyenne : 36 %; influx élevés au sommet de la zone), le bouleau (36 %; présence de macrorestes), le pin gris (11 %) et le mélèze laricin (1 %; présence de macrorestes) étaient toujours présents, du moins régionalement.

Chez les arbustes, la représentation des éricacées affiche une nette augmentation (macrorestes de *Chamaedaphne calyculata* (Linnaeus) Moench) et des pièces d'*Alnus* sp. sont aussi présentes. En ce qui concerne les plantes aquatiques, des pièces microfossiles ont été trouvées jusqu'au niveau 145 cm (*Chara* sp., *Nitella* sp., *Najas flexilis*).

Zone P-IV (155- 30 cm; ca 5550 – 60 ans A.A.)

La Zone P-IV est comprise entre les profondeurs 155 et 30 cm. Au total, 40 taxons polliniques et 23 taxons microfossiles ont été identifiés. La concentration pollinique moyenne est semblable à celle de la zone précédente (243 107 grains cm⁻³). Les valeurs sont néanmoins plus élevées entre les niveaux 75 et 40 cm, ce qui correspond au ralentissement du rythme d'accumulation de la tourbe. C'est durant cette longue période qu'a débuté, vers 5220 ans A.A. (145 cm), l'accumulation de la tourbe et que s'est produite la disparition des plantes aquatiques. La sous-zone P-IVa, comprise entre les niveaux 155 et 89 cm (ca 5550 à 4079 ans A.A.) est principalement caractérisée par une diminution de la représentation pollinique moyenne du sapin baumier (2 %), alors que celle de l'épinette augmente. Des aiguilles d'épinette et de mélèze laricin ainsi que plusieurs graines de bouleau ont été trouvées. Toutefois, à partir du niveau 98 cm, on observe une nette diminution des macrorestes d'arbres. La représentation pollinique du pin gris (10 % en moyenne) demeure relativement constante, de même que celle du bouleau (37 %). On note aussi une augmentation des cypéracées (52 %), traduisant une phase minérotrophe de la tourbière. Les influx polliniques montrent d'importantes fluctuations synchrones entre les espèces au début de la sous-zone. Elles résultent probablement de modifications au sein du processus de sédimentation correspondant à la transition lac-tourbière. La sous-zone P-IVb (89-30 cm; ca 4079 à 60 ans A.A.) se caractérise principalement par une diminution graduelle de la représentation pollinique du bouleau, autant en pourcentage qu'en influx. En revanche, celles de l'épinette (47 %), du pin gris (12 %) et du sapin baumier (2 %) demeurent relativement constantes. La représentation pollinique des éricacées est relativement élevée entre 93 et 50 cm, marquant la tendance vers l'ombrotrophisation de la tourbière. Plusieurs graines de *Chamaedaphne calyculata* ont d'ailleurs été extraites dans les niveaux correspondants.

Zone P-V (30-0 cm; <60 ans A.A.)

La Zone P-V, au sommet de la carotte sédimentaire, correspond aux dernières décennies de l'histoire de la végétation. Au total, 29 taxons polliniques et 8 taxons macrofossiles ont été identifiés. La concentration pollinique y est nettement plus faible comparativement au reste du profil (moyenne : 23 748 grains cm^{-3}). Cette diminution est attribuable à la faible compaction et à la faible décomposition de la tourbe en surface, ce qui a comme conséquence une dilution des grains de pollen. En contrepartie, les valeurs des influx sont très élevées en raison du taux d'accumulation net très rapide.

Cette zone se caractérise par une présence continue du pollen de l'herbe à poux (*Ambrosia*), témoignant d'activités anthropiques à l'échelle de la région. On note surtout une augmentation significative du pourcentage de pollen du pin gris (22 %), alors que celui du bouleau diminue fortement (13 %). En contrepartie, le sapin baumier affiche une représentation pollinique faible, mais continue (2 %), des pièces macrofossiles du sapin n'ayant été trouvées que dans le niveau supérieur. Outre quelques aiguilles d'épinette et des graines d'éricacées, les pièces macrofossiles sont peu nombreuses.

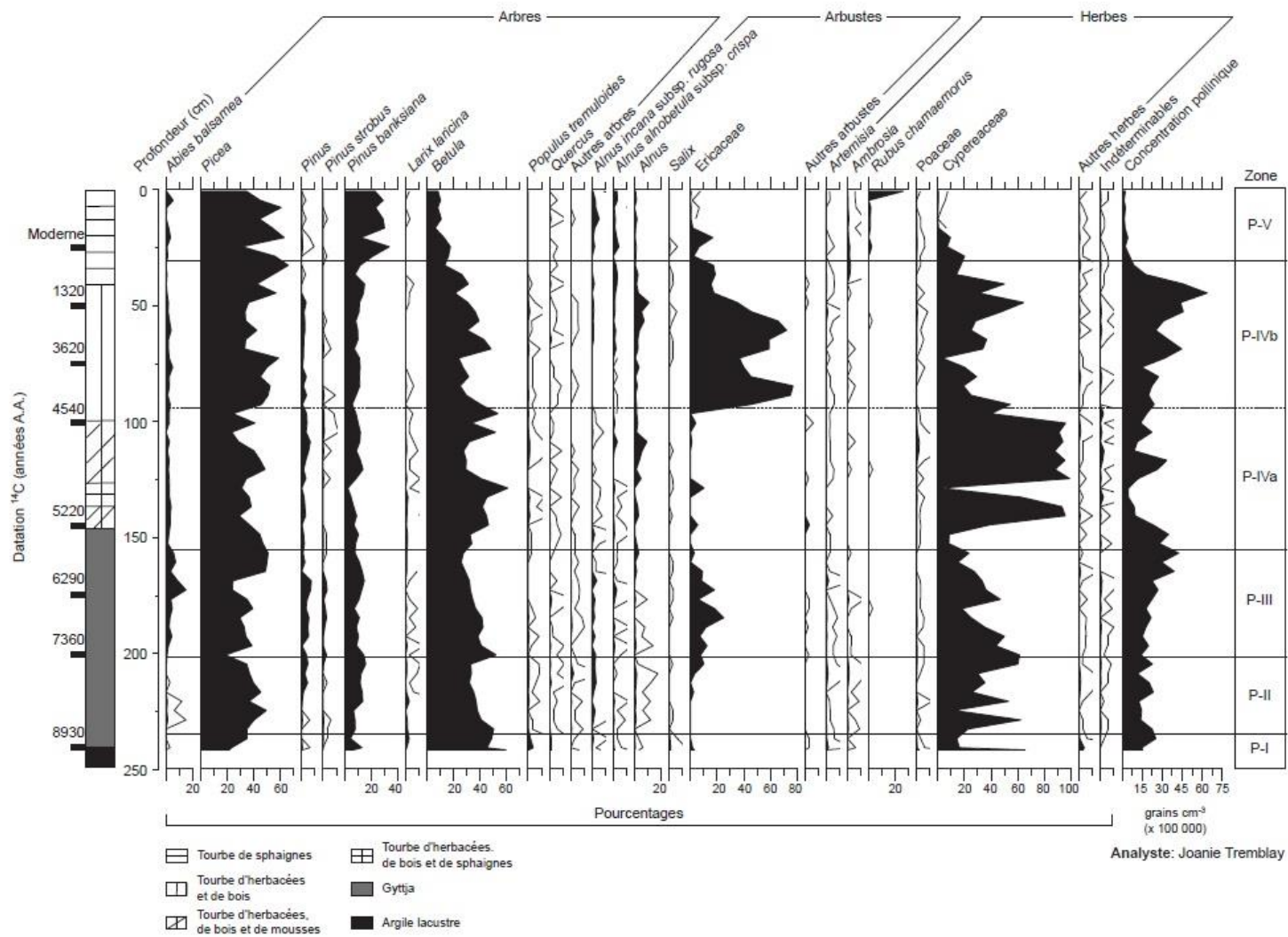


Figure 12: Diagramme pollinique en pourcentage du site Ignis.

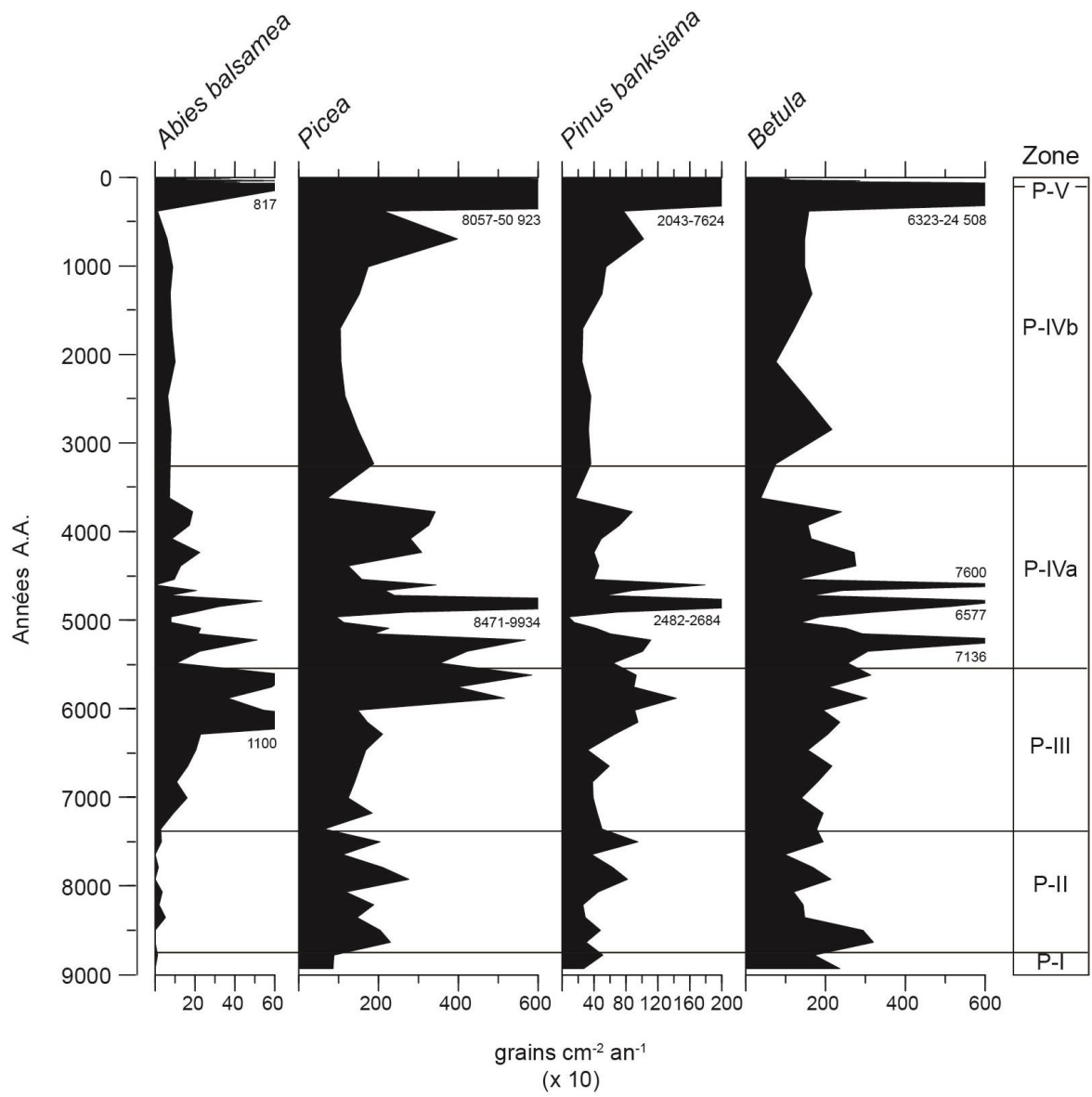


Figure 13: Diagramme d'influx polliniques (grains $\text{cm}^{-2} \text{an}^{-1}$) du site Ignis.

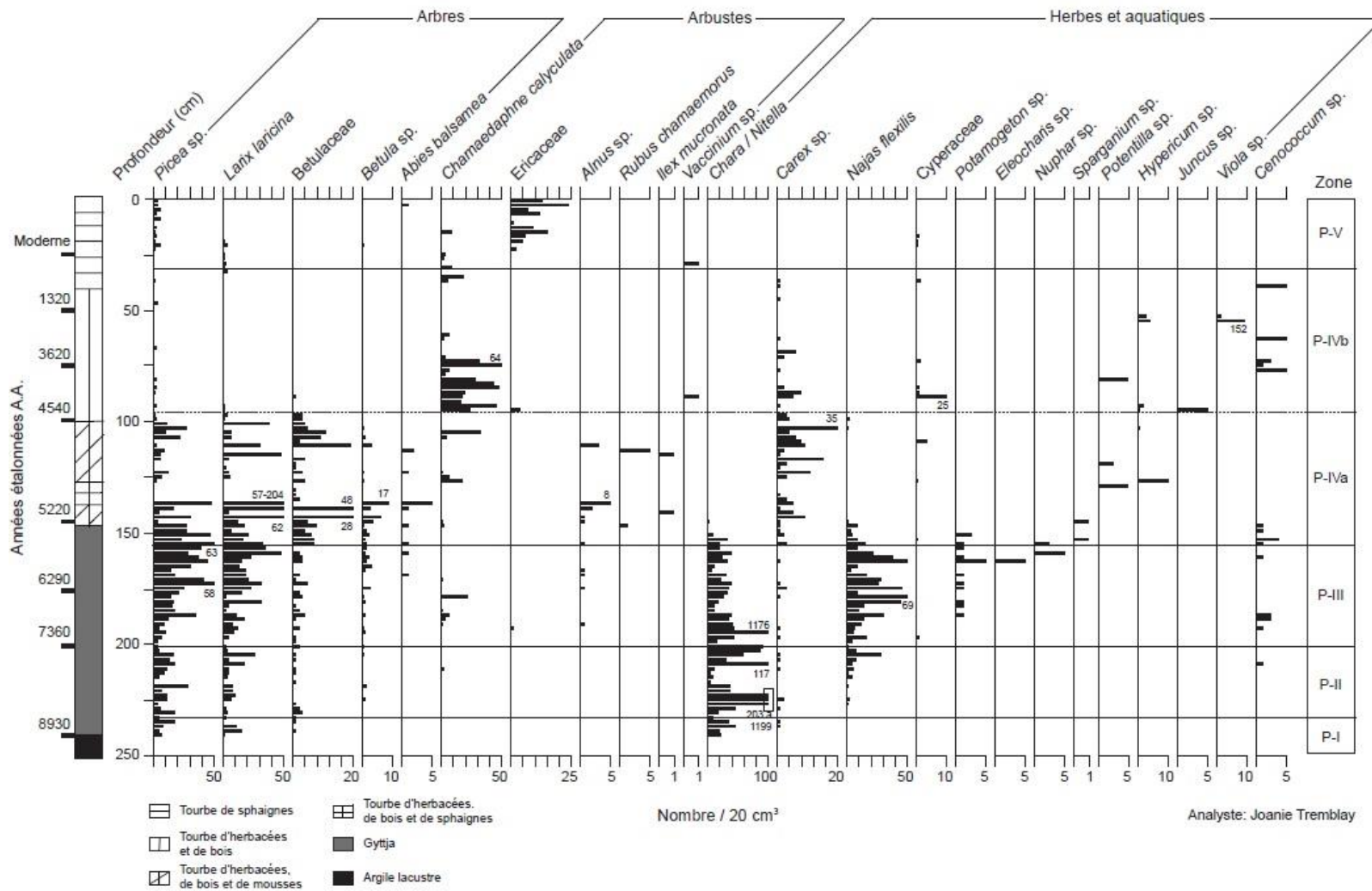


Figure 14: Diagramme macrofossile du site Ignis.

4.3 Données anthracologiques

Des 121 niveaux de la carotte sédimentaire analysés pour l'analyse macrofossile, 52 d'entre eux renfermaient des charbons de bois de taille supérieure à 850 μm , leur nombre variant de 1 à 100/20 cm^3 selon le cas (**Figure 15**). Au total, 753 pièces ont été dénombrées. De ce nombre, 91 pièces (12 %) avaient une taille supérieure à 2 mm réparties dans 22 niveaux, leur nombre étant généralement inférieur à 10 par niveau (maximum de 28 à 61 cm de profondeur). Enfin, les valeurs d'anthracomasse des pièces de taille supérieure à 2 mm sont en général inférieures à 5 $\text{mg}/20 \text{ cm}^3$ et on observe une correspondance entre leur nombre et leur poids. Chez les charbons de taille comprise entre 850 μm à 2 mm, il y en avait en général moins de 30 par niveau, sauf vers 50 cm de profondeur où quelques niveaux successifs en contenaient de grandes quantités (>200). À la lumière de ces résultats, cinq principales périodes d'activité de feu ont été définies (périodes C-I à C-V).

La première période (C-I), entre *ca* 8930 et 7000 ans A.A. (242-193 cm), correspond aux zones d'assemblage pollinique P-I et P-II. Durant cette période, le nombre et les valeurs d'anthracomasse des charbons de taille >2 mm sont élevés. Seize des 25 niveaux analysés renferment des pièces carbonisées, ce qui suggère qu'au moins 16 activités de feux auraient eu lieu pendant environ 2000 ans. Le charbon de bois le plus ancien a été trouvé au niveau 230 cm; par interpolation, il daterait d'environ 8420 ans A.A. Parmi les pièces, ayant fait l'objet d'une identification botanique, six étaient des épinettes et une était du sapin baumier (**Tableau III**). Des charbons d'éricacées ont aussi été identifiés (224-225 cm).

La deuxième période (C-II), entre *ca* 7000 et 4750 ans A.A. (193-115 cm), correspond aux zones d'assemblage pollinique P-III et P-IVa. Elle correspond sur le plan stratigraphique à l'amorce du processus d'entourbement dans la tourbière, de même qu'à l'augmentation importante de la représentation pollinique du sapin baumier. Durant cette période d'une durée de plus de 2000 ans, aucun charbon de bois de taille supérieure à 2 mm n'a été trouvé. On note aussi une diminution de la représentation des charbons de plus petite taille.

Leur représentation est particulièrement faible entre les niveaux 149 et 121 cm. Seize des 39 niveaux analysés renfermaient des pièces carbonisées, ce qui suggère que le nombre maximal d'évènements de feux ayant eu lieu était aussi de 16.

La troisième période (C-III; *ca* 4750 à *ca* 3230 ans A.A.), entre les profondeurs 115 et 73 cm, chevauche les sous-zones polliniques P-IVa et P-IVb. Elle correspond localement à l'instauration des conditions ombrotrophes dans la tourbière. Elle se caractérise par la présence de quelques pièces carbonisées de grande taille (3) chez trois niveaux (93, 99 et 113 cm). La plupart des pièces sont des conifères (**Tableau III**). Quelques charbons de bois de plus petite taille (8) ont aussi été dénombrés dans quatre niveaux. Des 21 niveaux analysés, 5 contenaient des charbons de taille supérieure à 850 µm, suggérant qu'au moins cinq feux auraient eu lieu à proximité du point d'échantillonnage.

La quatrième période (C-IV), de *ca* 3240 à 420 ans A.A. (73-41 cm), correspond à la seconde moitié de la sous-zone d'assemblage pollinique P-IVb. Le nombre de charbons de taille supérieure à 2 mm est très élevé dans plusieurs niveaux, leur nombre variant de 1 à 28. Les anthracomasses correspondantes sont aussi élevées. Parmi les pièces identifiées, 16 sont des éricacées. La même situation prévaut aussi chez les plus petits charbons qui sont très abondants. Des 16 niveaux analysés, seulement deux ne renferment pas de pièces carbonisées, ce qui suggère l'occurrence de 14 feux.

La cinquième et dernière période (C-V) correspond aux 41 centimètres supérieurs de la carotte sédimentaire, soit les 400 dernières années. Elle correspond au sommet de la sous-zone pollinique P-IVb et à la Zone P-V. La quantité de charbon est très faible, un seul charbon de taille supérieure à 2 mm ayant été trouvé (22-23 cm). On note aussi l'absence de charbon de plus petite taille.

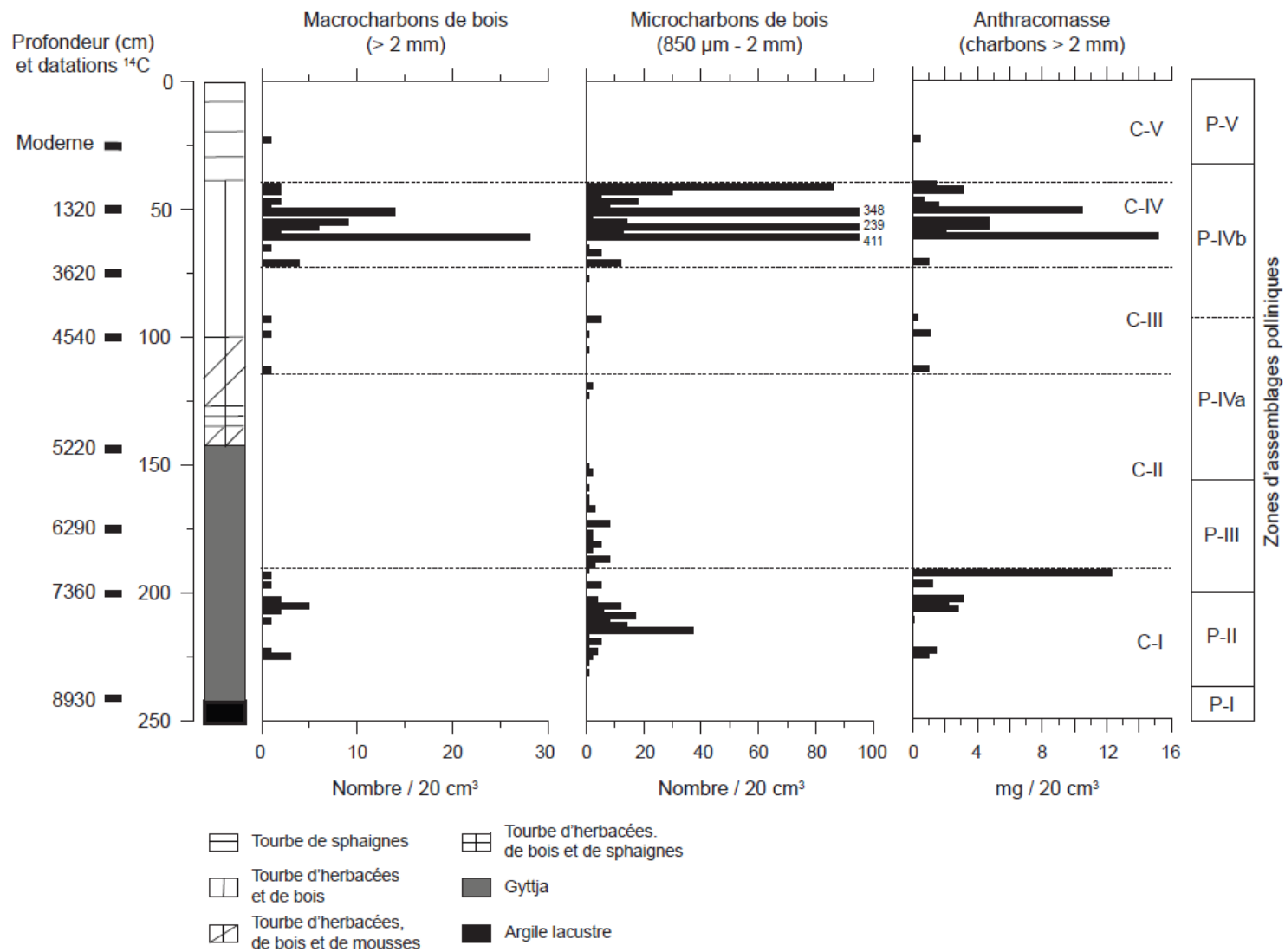


Figure 15: Diagramme anthracologique de la carotte sédimentaire de la tourbière Ignis.

Tableau III: Identification botanique des charbons de bois de taille supérieure à 2 mm trouvés dans la carotte sédimentaire du site *Ignis*.

Profondeur (cm)	Charbon*
22-23	Indéterminé
40-41	Conifère non identifié (2)
42-43	Indéterminé; Conifère non identifié
46-47	Ericaceae (2)
48-49	Conifère non identifié
50-51	Ericaceae (9); Conifère non identifié (4); Indéterminé
54-55	Conifère non identifié (9)
56-57	Conifère non identifié (6)
58-59	Ericaceae (2)
60-61	<i>Picea</i> sp. (11); Conifère non identifié (7); Indéterminé (8); Ericaceae (2)
70-71	<i>Picea</i> sp.; Ericaceae; Conifère non identifié (2)
92-93	Conifère non identifié
98-99	Conifère non identifié
112-113	Conifère non identifié
192-193	<i>Abies balsamea</i>
196-197	<i>Picea</i> sp.
202-203	<i>Picea</i> sp.; Conifère non identifié
204-205	<i>Picea</i> sp. (2); Conifère non identifié (3)
206-207	<i>Picea</i> sp.; Indéterminé
210-211	Conifère non identifié
222-223	Indéterminé
224-225	<i>Picea</i> sp.; Ericaceae; Indéterminé

*Le chiffre indiqué entre parenthèses indique le nombre de charbons identifiés pour le taxon en question.

5. Discussion

5.1 Histoire holocène de la végétation et des feux

L'analyse sporopollinique, des macrorestes végétaux et des charbons de bois d'une carotte sédimentaire prélevée à la marge de la tourbière a permis de reconstituer les principales étapes de l'histoire postglaciaire d'une station actuellement occupée par une sapinière à bouleau à papier au sein de la Pessière à mousses de l'Ouest. La datation radiochronologique de la base de la carotte a révélé un âge d'environ 8930 ans A.A. au contact organo-minéral. La portion inférieure du dépôt organique, constituée de gyttja, repose sur des sédiments minéraux d'origine glaciolacustre mis en place lors de l'épisode du lac proglaciaire Ojibway-Barlow (Dyke et al., 2003). Les assemblages polliniques et macrofossiles témoignent d'un paysage initial forestier ou presque occupé par l'épinette (sans doute l'épinette noire), le pin gris, le bouleau à papier, le peuplier faux-tremble et le mélèze laricin. Le couvert forestier n'était probablement pas complètement fermé, comme le suggère la représentation pollinique de l'armoise (*Artemisia*) et du saule dans les premiers spectres polliniques. Les concentrations polliniques, relativement élevées, indiquent néanmoins qu'il devait toutefois être déjà relativement dense. Il n'y a donc pas eu dans le secteur immédiat du site Ignis d'épisode de toundra arbustive ayant précédé l'arrivée des arbres, comme l'ont proposé Garralla et Gajewski (1992) plus au sud dans la région avoisinant la municipalité de Chibougamau avant 8400 ans A.A. (lac CH2; **Figure 1**).

La période s'échelonnant entre 8930 et 8700 ans A.A (Zone pollinique P-I) reflète donc une phase d'afforestation ayant suivi le retrait des eaux du lac Ojibway, dont la durée est indéterminée. En effet, la date du sédiment à la base de la gyttja est plus vieille de quelques siècles (de 400 à 600 ans) que celles d'autres lacs et tourbes à l'est du lac Mistassini (El Guellab et al., 2015) ou plus au sud dans la région de Chibougamau (Prichonnet et al., 1984; Garralla et Gajewski, 1992). La tourbière Ignis se trouve près des limites latitudinale et altitudinale maximales atteintes dans la région par le lac Ojibway, la limite altitudinale du lac étant estimée à environ 440 m (Prichonnet et al., 1984; Veillette, 1994), soit la même altitude que la tourbière à l'étude. Il est donc possible que la régression lacustre du secteur

de la tourbière Ignis se soit produite très rapidement. La sédimentation organique aurait alors débuté plus rapidement que dans les autres lacs de la région puisque ces derniers auraient été ennoyés plus longtemps en raison de leur position topographique moins élevée.

À la suite de cette brève phase d'afforestation, le couvert forestier s'est fermé entre 8700 et 7360 ans A.A., phase correspondant à une augmentation marquée de la représentation pollinique de l'épinette et du pin gris (Zone pollinique P-II). Le paysage végétal régional était alors occupé par une pessière, d'après la forte représentation pollinique de l'épinette. Cette interprétation appuie l'avis de Richard (1995) qui suggérait la présence d'une pessière fermée comportant une grande abondance de bouleau à papier dans la région du lac Mistassini il y a au moins 6800 ans. La représentation du pin gris était aussi élevée au sein de cette pessière. C'est à cette époque que sont enregistrés les premiers charbons de bois, dont le plus vieux datant de 8420 ans A.A. (selon le modèle d'âge). La plupart des niveaux analysés correspondant à la zone pollinique P-II contiennent des charbons, dont plusieurs de taille >2 mm, attestant alors de nombreux feux.

L'augmentation du pourcentage et de l'influx du sapin baumier vers 7300 ans A.A. (Zone pollinique P-III) suggère la présence de l'espèce dans la station de la sapinière du site Ignis. La représentation pollinique du sapin varie de 3 à 15 % dans les assemblages polliniques modernes de la sapinière à bouleau papier de l'est du Québec, 10 % étant considéré exceptionnel (Richard, 1993). Dans le diagramme pollinique Ignis, elle varie de 2 à 15 %, de 7300 ans à 5550 ans A.A. Le paysage végétal régional était alors sans doute composé d'une mosaïque de pessières et de sapinières. L'allure discontinue de la courbe pollinique du pourcentage du sapin avant 7300 ans A.A. ne permet toutefois pas de s'avancer quant à une arrivée locale plus précoce de l'espèce; il s'agissait fort probablement d'apports polliniques lointains (faibles influx), comme cela fut observé ailleurs à la base d'autres séquences sédimentaires (Fréchette et al., 2017). Pendant environ 1400 ans (7360-5550 ans A.A.), l'espèce a été plus abondante que de nos jours. Dans le diagramme pollinique du lac CH2 plus au sud, le sapin n'atteint guère plus de 1% (Garralla et Gajewski, 1992). Ces données confirment que le diagramme pollinique du site Ignis livre une image plus locale et extra-locale de l'histoire de la végétation comparativement à celui du lac CH2.

D'autres travaux paléocéologiques effectués dans la pessière à mousses et dans la pessière à lichens ont aussi suggéré une plus grande abondance du sapin baumier pendant l'Holocène moyen. Au nord de la région de Matagami, Asselin et al. (2016) rapportent une plus grande abondance du sapin baumier entre 6800 et 1000 ans A.A. Ce serait des feux sévères survenus au cours des 1000 dernières années qui auraient causé une diminution de l'abondance du sapin. Dans les environs du réservoir Caniapiscou, l'espèce aurait atteint un maximum de représentation entre 5600 et 4000 ans A.A. (Richard et al., 1982). Plus au nord, en Jamésie, Arseneault et Sirois (2004) ont trouvé des macrorestes de sapin baumier (troncs) datés entre 5100 et 4700 ans A.A. enfouis dans le sol d'une forêt dominée présentement par l'épinette noire et le pin gris. L'espèce est aujourd'hui rare dans cette région et cantonnée à quelques endroits en bordure du lac Duncan (au sud de Radisson), à l'écart des feux (Sirois, 1997) et des environs du réservoir Caniapiscou au centre du Québec (Payette, 2013).

De nombreux charbons bois ont été dénombrés pendant la période de plus grande abondance du sapin, mais leur nombre par niveau est moins élevé que précédemment. En outre, aucun charbon de taille >2 mm n'a été trouvé entre les niveaux 193 et 155 cm (ca. 7030-5550 ans A.A.). Sur le plan stratigraphique, cette période correspond au comblement du lac et de l'amorce de l'accumulation de la tourbe. Dans la partie inférieure de la carotte composée de gyttja (242-146 cm), toutes les particules de charbons de bois ont été transportées par le vent. Toutefois, étant donné que le point d'échantillonnage de la carotte se trouve au contact de la forêt, et que le lac de l'époque était relativement petit, il est probable malgré tout que les charbons dénombrés (>850 μ m) sont tous d'origine locale.

Bien que des feux soient survenus pendant la période de plus grande abondance du sapin baumier, il est difficile d'en estimer le nombre. À titre d'hypothèse, la moins grande quantité de charbons par niveau et l'absence de pièces de taille supérieure à 2 mm (comparativement à la période précédente) suggèrent que les feux ayant affecté la station de la sapinière étaient peu sévères (feux de surface), ce qui expliquerait la représentation pollinique élevée du sapin baumier et son maintien dans le peuplement forestier de l'époque. D'après l'analyse de charbons de bois de taille macroscopique préservés dans les sédiments de quatre lacs voisins à l'ouest du lac Mistassini (**Figure 1**), El Guellab et al. (2015) ont suggéré une forte fréquence des feux entre 7000 et 4000 ans A.A.

C'est vers 5220 ans A.A. qu'a débuté l'accumulation de la tourbe au point d'échantillonnage. Au cours de son développement, la tourbière a d'abord connu jusque vers 4100 ans A.A. une phase de minérotrophie représentée par les cypéracées. Peu de charbons ont été dénombrés lors de cette étape de fen, appuyant l'idée que ce type de tourbière est peu propice à la propagation du feu en raison des conditions humides en surface et du peu de combustible disponible (Busque et Arseneault, 2005; Magnan et al., 2012). L'ombrotrophisation subséquente de la tourbière est marquée par le remplacement des cypéracées par les éricacées. Les conditions de surface moins humides et la présence de combustible ligneux ont fort probablement permis au feu de se propager dans la tourbière. De plus, les nombreux charbons trouvés dans quelques niveaux vers 50 cm de profondeur confirment la propagation du feu dans la tourbière, comme l'indiquent aussi les nombreuses pièces d'éricacées carbonisées dans ces mêmes niveaux (**Tableau III**).

L'augmentation progressive du nombre de charbons à partir de 4900 ans A.A. (périodes C-III et C-IV) suggère des feux fréquents, surtout au cours des 2000 dernières années où quelques niveaux successifs sont caractérisés par une grande abondance de charbons. Ces résultats sont aussi appuyés par de nombreux charbons trouvés dans le sol minéral de la sapinière à l'étude et datant de la même époque (P.L. Couillard, données non-publiées).

El Guellab et al. (2015) ont toutefois suggéré une diminution de la fréquence des feux jusqu'à nos jours (3 feux par millénaire), à l'exception d'une période centrée vers 1000 ans A.A. (4 feux par millénaire). Leur approche visant à reconstituer l'histoire des feux est fondée sur l'analyse des charbons de bois transportés par le vent et préservés dans des dépôts lacustres. Cette méthode reconstitue les feux ayant eu lieu au sein du bassin versant d'un lac et non pas nécessairement ceux ayant eu lieu localement. Des pics d'abondance de charbons de bois ont notamment été enregistrés dans des lacs dont les bassins versants n'ont pas brûlé (Whitlock et Millspaugh, 1996; Oris et al., 2014).

L'augmentation progressive de l'occurrence des incendies au cours des 4900 dernières années est synchrone avec la diminution de la représentation pollinique du sapin baumier. Ceci suggère un déclin de l'abondance du sapin, malgré le maintien probable de la sapinière jusqu'à nos jours. Le pourcentage du sapin est en effet demeuré relativement stable (2 %) jusqu'à nos jours.

À partir de 4900 ans A.A., le cortège floristique associé à la sapinière et le régime des feux auraient prévalu au site à l'étude à partir de cette période, comme ce fût aussi le cas dans la pessière noire à mousses au nord du lac Saint-Jean (Frégeau et al., 2015; MFFP, 2016), dans les sapinières d'altitude (de Lafontaine et Payette, 2011) et dans les pessières d'épinette blanche (de Lafontaine et Payette, 2012). Bien que de nombreux feux ont prévalu au cours de l'Holocène supérieur, la faible mais continue représentation pollinique du sapin baumier suggère sa survie et le maintien local de la sapinière tout au long de cette période. Selon cette interprétation, le cortège floristique associé à la sapinière à bouleau à papier aurait été conservé localement et serait de nature résiduelle depuis plus de 7000 ans. Un tel scénario appuie l'hypothèse que le sapin baumier était plus abondant qu'autrefois et, qu'en raison d'un changement du régime de feux, il serait maintenant devenu moins abondant localement. L'ensemble des données paléoécologiques obtenues au site Ignis suggère donc que la sapinière à bouleau à papier est un écosystème en mesure de se maintenir sous le régime de feu actuel de la région de Chibougamau.

6. Conclusion

Bien que le sapin baumier soit une espèce moins bien adaptée au feu, on trouve au sein du domaine bioclimatique de la Pessière à mousses de l'Ouest de petites sapinières, souvent cantonnées à des versants de collines qui agissent parfois comme des barrières topographiques contre la propagation du feu. La présente étude paléoécologique avait pour objectif principal de reconstituer l'histoire postglaciaire de la végétation et des feux d'une station occupée par une petite sapinière à bouleau à papier et de tester l'hypothèse que l'abondance locale du sapin fut variable en fonction des différents régimes de feux.

Les résultats des analyses polliniques et macrofossiles suggèrent la constitution d'un couvert forestier qui était déjà présent relativement peu de temps après l'épisode du lac proglaciaire Ojibway-Barlow, il y a un peu plus de 8900 ans A.A. La fermeture du couvert forestier est survenue il y a environ 8700 ans A.A. Le paysage végétal régional était alors une pessière. De nombreux charbons bois témoignent que les feux étaient alors fréquents. Le sapin baumier s'est installé localement vers 7300 ans A.A. et l'espèce fut plus abondante que de nos jours jusque vers 5500 ans A.A. Des feux sont survenus durant cette période de plus grande abondance de sapin, mais il est difficile d'en estimer le nombre. Ils étaient probablement moins sévères, ce qui expliquerait la représentation pollinique élevée du sapin baumier. La représentation pollinique du sapin baumier a ensuite diminué, mais elle est demeurée stable jusqu'à nos jours, lors d'une recrudescence de feux. Les résultats des analyses paléoécologiques suggèrent donc que la sapinière à bouleau à papier s'est maintenue localement depuis plus de 7000 ans A.A. et ce, malgré l'occurrence de plusieurs feux. La sapinière se serait donc maintenue localement pendant plusieurs millénaires malgré le fait qu'elle a évolué dans un environnement de feu.

La présente méthode d'analyse des charbons de bois n'a pas permis de calculer le nombre de feu ayant eu lieu au sein de la sapinière à bouleau à papier, ni leur fréquence. La datation d'un nombre élevé de charbons de bois permettrait non seulement d'y parvenir, mais aussi de calculer les intervalles de feux pendant l'Holocène. Ceci permettrait entre autres de mieux cerner le régime de feu qui a prévalu pendant la plus grande abondance locale du sapin, et de valider l'hypothèse de feux alors moins sévères. Des travaux portant sur la datation ^{14}C de charbons de bois conservés dans les sols minéraux de la sapinière sont présentement en cours (P.L. Couillard, données inédites); ils permettront de confronter le signal des incendies issus des charbons des sols à celui de la carotte sédimentaire. La confrontation des deux signaux apportera aussi des informations à savoir si la diminution de l'abondance du sapin pendant l'Holocène supérieur résulte de feux plus fréquents (et plus sévères ?) que ceux de l'Holocène moyen.

7. Références

Anderson, T.W. 1995. Forest changes in the Great Lake region at 5-7 ka BP. *Géographie physique et Quaternaire*, 49: 99-116.

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

Asselin, M., Grondin, P., Lavoie, M. et Fréchette, B. 2016. Fires of the last millennium led to landscapes dominated by early successional species in Québec's Clay Belt boreal forest, Canada. *Forests*, 7: 205.

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

Bhiry, N. et Filion, L. 2001. Analyse des macrorestes. Pages 259-273 dans Payette, S. et Rochefort, L. (éditeurs). *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Les Presses de l'Université Laval, St-Nicolas.

Bouchard, M., Pothier, D. et Gauthier, S. 2008. Fire return intervals and tree species succession in the North Shore region of eastern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 38: 1621-1633.

Busque, D. et Arseneault, D. 2005. Fire disturbance of larch woodlands in string fens in northern Quebec. *Canadian Journal of Botany*, 83: 599-609.

Carcaillet, C., Bergeron Y., Richard, P.J.H., Fréchette, B., Gauthier, S. et Prairie, Y.T. 2001. Change of fire frequency in the eastern Canadian boreal forests during the Holocene: does vegetation composition or climate trigger the fire regime? *Journal of Ecology*, 89: 930-946.

Carcaillet, C., Richard, P.J.H., Bergeron, Y., Fréchette, B. et Ali, A.A. 2010. Resilience of the boreal forest in response to Holocene fire-frequency changes assessed by pollen diversity and population dynamics. *International Journal of Wildland Fire*, 19: 1026-1039.

de Lafontaine, G. et Payette, S. 2011. Shifting zonal patterns of the southern boreal forest in eastern Canada associated with changing fire regime during the Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 30: 867-875.

de Lafontaine, G. et Payette, S. 2012. Long-term fire and forest history of subalpine balsam fir (*Abies balsamea*) and white spruce (*Picea glauca*) stands in eastern Canada inferred from soil charcoal analysis. *The Holocene*, 22: 191-201.

Dyke, A.S. 2004. An outline of North American deglaciation with emphasis on central and northern Canada. Geological Survey of Canada, 371-406.

Dyke, A.S., Moore, A. et Robertson, L. 2003. Deglaciation of North America. Geological Survey of Canada, Ottawa, Open file 1574, CD-ROM.

El Guellab, A., Asselin, H., Gauthier, S., Bergeron, Y. et Ali, A.A. 2015. Holocene variations of wildfire occurrence as a guide for sustainable management of the northeastern Canadian boreal forest. *Forest Ecosystem*, 2: 15.

Environnement Canada. 2014. Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1981 à 2010. Chapais 2, Québec. <http://climat.meteo.gc.ca>

Faegri, K., Kaland, P.E. et Krzywinski, K. 1989. Textbook of Pollen Analysis. 4th ed. John Wiley & Sons, New York, 338 p.

Fréchette, B., Richard, P.J.H., Grondin, P., Lavoie, M. et Larouche, A.C. 2017. 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, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 179.

Frégeau, M., Payette, S. et Grondin, P. 2015. Fire history of the central boreal forest in eastern North America reveals stability since the mid-Holocene. *The Holocene*, 25: 1912-1922.

Gagnon, R. et Morin, H. 2001. Les forêts d'épinette noire du Québec : dynamique, perturbations et biodiversité. *Le Naturaliste canadien*, 125: 26-35.

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

Heiri, O., Lotter, A.F. et Lemcke, G. 2001. Loss-on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 25: 101-110.

Jacquot, C. 1955. Atlas d'anatomie du bois des conifères. Centre technique du bois, Paris France, 133 p.

Jeglum, J.K., Rothwell, R.L., Berry, G.J. et Smith, G.K.M. 1992. A peat sampler for rapid survey. Technical note, Canadian Forestry Service 13: 921-932.

Lavoie, M. 2001. Analyse des microrestes. Pages 295-309 dans Payette, S. et Rochefort, L. (éditeurs). *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Les Presses de l'Université Laval, St-Nicolas.

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

Lévesque, P.E.M., Diné, H. et Larouche, A. 1988. Guide illustré des macrofossiles végétaux des tourbières du Canada. Agriculture Canada, Ottawa, Publication #1817.

Liu, K.B. 1990. Holocene paleoecology of the boreal forest and Great-Lakes-St. Lawrence forest in northern Ontario. *Ecological Monographs*, 60: 179-212.

Magnan, G., Lavoie, M. et Payette, S. 2012. Impact of fire on long-term vegetation dynamics of ombrotrophic peatlands in northwestern Québec, Canada. *Quaternary Research*, 77: 110-121.

McAndrews, J.H., Berti, A.A. et Norris, G. 1973. Key to the Quaternary Pollen and Spores of the Great Lakes Region, Royal Ontario Museum Life Sciences Miscellaneous Publication, 61 p.

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP). 2016. Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec. <http://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/inventaire-zones-carte.jsp>

Montgomery, F.H. 1977. Seeds and Fruits Plants of Eastern Canada and Northeastern United States. University of Toronto Press, Toronto.

Morin, H. et Laprise, D. 1990. Dendrochronology of spruce budworm outbreaks North of Lac-Saint-Jean (Québec). *Canadian Journal of Forest Research*, 20: 1-8.

Morneau, C. 2009. Domaine de la pessière noire à mousses. Dans *Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (éditeur). Manuel de foresterie*, 2e édition. Éditions MultiMondes, Québec, pp. 262-274.

Ohlson, M. et Tryterud, E. 2000. Interpretation of the charcoal record in forest soils: forest fires and their production and deposition of macroscopic charcoal. *The Holocene*, 10: 519-525.

Oris, F., Ali, A.A., Asselin, H., Paradis, L., Bergeron, Y. et 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.

Ouarmim, S., Asselin, H., Bergeron, Y., Ali, A. et Hély, C. 2014a. Stand structure in fire refuges of the eastern Canadian boreal mixedwood forest. *Forest Ecology and Management*, 324: 1-7.

Ouarmim, S., Asselin, H., Hély, C., Bergeron, Y. et Ali, A. 2014b. Long-term dynamics of fire refuges in boreal mixedwood forests. *Journal of Quaternary Science*, 29: 123-129.

Panshin, A.J. et de Zeeuw, C. 1980. *Textbook of Wood Technology*, 4th edition. McGraw-Hill Book Company, New York.

Payette, S. 2013. *Flore nordique du Québec et du Labrador - Tome 1*. Presses de l'Université Laval, Québec.

- Payette, S., Delwaide, A., Schaffhauser, A. et Magnan, G. 2012. Calculating long-term fire frequency at the stand scale from charcoal data. *Ecosphere*, 3: 1-16.
- Prichonnet, G., Martineau, G. et Bisson, L. 1984. Les dépôts quaternaires de la région de Chibougamau, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 38: 287-304.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Burr, G.S., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., McCormac, F.G., Manning, S.W., Reimer, R.W., Richards, D.A., Southon, J.R., Talamo, S., Turney, C.S.M., van der Plicht, J. et Weyhenmeyer, C.E. 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 51: 1111-1150.
- Richard, P.J.H. 1970. Atlas pollinique des arbres et de quelques arbustes indigènes du Québec. *Le Naturaliste canadien*, 97: 1-34, 97-161, 241-306.
- Richard, P.J.H. 1993. Origine et dynamique postglaciaire de la forêt mixte au Québec. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 79: 31-68.
- Richard, P.J.H. 1995. Le couvert végétal du Québec-Labrador il y a 6000 ans BP : essai. *Géographie physique et Quaternaire*, 49: 117-140.
- Richard, P.J.H., Larouche, A. et Bouchard, M. 1982. Âge de la déglaciation finale et histoire postglaciaire de la végétation dans la partie centrale du Nouveau-Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 36: 63-90.
- Saucier, J.-P., Grondin, P., Robitaille, A., Gosselin, J., Morneau, C., Richard, P.J.H., Brisson, J., Sirois, L., Leduc, A., Morin, H., Thiffault, É., Gauthier, S., Lavoie, C. et Payette, S. 2009. Écologie forestière. Dans *Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (éditeur). Manuel de foresterie, 2e édition. Éditions MultiMondes, Québec*, pp. 165-316.
- Schweingruber, F.H. 1990. Anatomie europäischer Hölzer. Anatomy of European woods. Eidgenöss. Forschungsanst für Wald, Schnee und Landschaft. Bern: Verlag Paul Haupt, 800 p.
- Sirois, L. 1997. Distribution and dynamics of balsam fir (*Abies balsamea* [L.] Mill.) at its northern limit in the James Bay area. *Ecoscience*, 4: 340-352.
- Tremblay, M.J., Rossi, S. et Morin, H. 2012. Growth dynamics of black spruce in stands located between the 51st 52nd parallels in the boreal forest of Quebec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 41: 1769-1778.
- Veillette, J. 1994. Evolution and paleohydrology of glacial lakes Barlow and Ojibway. *Quaternary Science Reviews*, 13: 945-971.

Whitlock, C. et Millspaugh, S. H. 1996. Testing the assumptions of fire-history studies: an examination of modern charcoal accumulation in Yellowstone National Park, USA. *The Holocene*, 6: 7-15.