



# **Dynamique contemporaine et à long terme des peuplements forestiers de la tourbière de Saint- Georges-de-Clarenceville en Montérégie**

**Mémoire**

**Maude Demers**

**Maîtrise en sciences géographiques - avec mémoire**  
Maître en sciences géographiques (M. Sc. géogr.)

Québec, Canada

# **Dynamique contemporaine et à long terme des peuplements forestiers de la tourbière de Saint-Georges-de-Clarenceville en Montérégie**

**Mémoire**

**Maude Demers**

Sous la direction de :

Martin Lavoie, directeur de recherche  
Pierre Grondin, codirecteur de recherche

## Résumé

Les activités anthropiques (agriculture, urbanisation) ont fortement influencé la dynamique des tourbières depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle dans la région physiographique des basses-terres du Saint-Laurent. En Montérégie, la vaste tourbière de Saint-Georges-de-Clarenceville est caractérisée par la présence de différents types de peuplements forestiers, notamment des peuplements feuillus dominés par l'érable rouge qui côtoient des peuplements conifériens, certains comportant du pin blanc. Ce projet avait pour objectifs 1) de dresser un portrait des peuplements forestiers de la tourbière pour les 100 à 200 dernières années, 2) de retracer leur dynamique à plus long terme, soit sur quelques millénaires et 3) de déterminer si l'établissement et la dynamique de la végétation forestière est d'origine anthropique ou naturelle. L'hypothèse qui a été testée est que la tourbière était autrefois colonisée naturellement par des peuplements forestiers à dominance coniférienne « typiques » des tourbières comme le mélèze laricin et l'épinette noire. En raison de perturbations anthropiques *in situ*, telles que la coupe forestière et le creusement de canaux de drainage, ces espèces auraient été graduellement remplacées par des peuplements arborescents à dominance feuillue et par des conifères « moins fréquents » dans de tels écosystèmes comme le pin blanc. Dans le but de documenter les différents peuplements forestiers, un portrait de la végétation arborescente fut réalisé le long d'un transect d'une longueur de 1 km. Pour six peuplements, des analyses dendrochronologiques ont été effectuées afin de dater les périodes d'établissement des arbres. Des profils de sol ont été creusés au sein de deux de ces sites afin de récolter, d'identifier et de dater des bois enfouis dans la tourbe. Plusieurs souches furent aussi échantillonnées et identifiées. Les résultats suggèrent que la présence du mélèze laricin, de l'épinette noire, du thuya occidental et du pin blanc sur la tourbière est naturelle et très ancienne (quelques milliers d'années). L'analyse des bois enfouis et des souches indique que le pin blanc est présent depuis au moins 3000 ans. En contrepartie, le développement en grande abondance d'espèces feuillues comme l'érable rouge et le bouleau jaune est plus récent et concorde, entre autres, avec des coupes forestières ayant lieu depuis de la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle par les différents propriétaires des lots de la tourbière. Ces perturbations auraient ainsi changé la dynamique forestière naturelle coniférienne vers des peuplements de plus en plus dominés par des espèces feuillues. L'érable rouge est présentement l'espèce la plus abondante au sein de la régénération et devrait éventuellement devenir l'espèce dominante.

# Table des matières

Résumé.....	ii
Table des matières .....	iii
Liste des figures .....	iv
Liste des tableaux.....	v
Liste des annexes.....	vi
Remerciements .....	vii
Avant-propos .....	viii
Introduction .....	1
Les perturbations des tourbières .....	1
Le boisement ancien ou naturel des tourbières.....	2
Les tourbières du sud du Québec .....	3
Objectifs et hypothèses .....	7
Chapitre 1 : Transformation des peuplements forestiers d'une vaste tourbière du sud du Québec sous l'influence des activités anthropiques des 200 dernières années : quelle essence est la gagnante ? .....	9
1.1 Résumé.....	9
1.2 Introduction.....	10
1.3 Méthodes .....	14
1.3.1 Site d'étude .....	14
1.3.2 Travaux sur le terrain .....	14
1.3.3 Travaux en laboratoire .....	17
1.4 Résultats .....	19
1.4.1 Dynamique actuelle des peuplements forestiers .....	19
1.4.2 Dynamique à long terme des peuplements forestiers .....	25
1.5 Discussion.....	28
1.5.1 La dynamique à long terme des peuplements forestiers sur tourbe.....	29
1.5.2 La dynamique contemporaine des peuplements forestiers : naturelle ou anthropique ?.....	30
1.6 Conclusion.....	32
Conclusion générale .....	34
Références.....	37
Annexes .....	44

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : Localisation du territoire à l'étude à échelle nationale, régionale et locale.....	12
<b>Figure 2</b> : Exemple d'une souche de pin blanc en état de décomposition avancée située près du site F2. ....	13
<b>Figure 3</b> : Photos des six sites étudiés.....	16
<b>Figure 4</b> : Profil topographique de la surface de la tourbière et peuplements forestiers présents le long du transect d'une longueur de 1000 m traversant la tourbière selon un axe est-ouest. ....	20
<b>Figure 5</b> : Structure de taille des peuplements forestiers des six sites étudiés.....	21
<b>Figure 6</b> : Dates d'établissement des différentes espèces arborescentes des six sites étudiés.....	22
<b>Figure 7</b> : Localisation des souches de pin blanc recensées au sein d'une superficie de 1 ha à proximité du site F2 et des individus vivants de pin blanc au sein d'une superficie équivalente près du point 450 m du transect. ....	26
<b>Figure 8</b> : Proposition d'un schéma de la dynamique successionale des peuplements forestiers des sites à l'étude .....	33

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Données concernant le nombre d'individus, la surface terrière (m <sup>2</sup> /ha) et la régénération (nombre d'individus/ha) des sites à l'étude. ....	23
<b>Tableau 2</b> : Dénombrement et identification botanique des fragments de bois récoltés dans la tourbe au sein des excavations des sites C1 et F1. ....	26
<b>Tableau 3</b> : Données chronologiques ( <sup>14</sup> C).....	27

## Liste des annexes

<b>Annexe 1 :</b> Tronc de pin blanc au sol près du site F2 bien conservé pour permettre une analyse dendrochronologique .....	44
<b>Annexe 2:</b> Tronc de pin blanc enfoui à environ 1.50 m de profondeur à 300 m au nord du site F2 .....	45
<b>Annexe 3:</b> Relevé de végétation (excluant les arbres) des sites à l'étude.....	46
<b>Annexe 4 :</b> Stratigraphie et contenu en charbons de bois macroscopiques du mètre supérieur de la tourbe récolté au sein de chacun des sites à l'étude. ....	47

## Remerciements

Pour débiter, je tiens à remercier mon directeur de recherche, Martin Lavoie, qui m'a guidé tout au long de ce projet de maîtrise. Je remercie aussi grandement mon codirecteur, Pierre Grondin, de la direction de la recherche forestière du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP), pour son implication dans ce projet, ainsi que ses nombreuses pistes de réflexion. Vous avez tous les deux investi beaucoup de temps dans ce projet et je vous en suis très reconnaissante.

Un merci spécial à toute l'équipe de la direction de la recherche forestière du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec qui a touché de près ou de loin à ce projet. Merci à Simon Marcouiller, Maxime Saulnier et Thierry Bergeron qui nous ont aidés lors des travaux de terrain malgré les conditions qui n'étaient pas toujours idéales. Un énorme merci à Véronique Poirier pour l'aide à la cartographie et la conception de schémas. Ce mémoire n'aurait pas été le même sans la contribution du MFFP. Je remercie aussi Ann Delwaide du Département de géographie de l'Université Laval pour son soutien précieux, ainsi que son aide lors de l'identification des bois fossiles et des analyses dendrochronologiques. Je suis aussi très reconnaissante envers M. Jean-Pierre Vézina, propriétaire de certains secteurs de la tourbière où j'ai mené mes travaux. M. Vézina a toujours été très intéressé par mon travail, en plus d'avoir participé à l'excavation des tranchés pour trouver les bois enfouis. Il a toujours patiemment répondu à nos nombreuses interrogations sur l'histoire de sa propriété.

Finalement, j'aimerais remercier mes amis et ma famille qui m'ont toujours encouragé à poursuivre mes projets.



## **Avant-propos**

Le chapitre 1 de ce mémoire est écrit sous forme d'un article scientifique en français. Cet article sera traduit en anglais et soumis ultérieurement à la revue scientifique *Forest Ecology and Management*. L'article s'intitule : Transformation des peuplements forestiers d'une vaste tourbière du sud du Québec sous l'influence des activités anthropiques des 200 dernières années : quelle essence est la gagnante ? Je suis moi-même, Maude Demers, l'auteur principal de cet article. J'ai participé à la collecte des données, effectué l'ensemble des analyses et interprété ceux-ci, et rédigé l'ensemble de l'article. Les coauteurs sont Martin Lavoie et Pierre Grondin qui ont participé à la collecte des données et aidé à la révision de l'article.

# Introduction

## Les perturbations des tourbières

Au cours du XX<sup>e</sup> siècle, les milieux humides (marais, marécages, tourbières) des régions tempérées, autant dans l'est de l'Amérique du Nord qu'en Europe, ont été grandement altérés par différentes perturbations. Parmi celles-ci, il y a les nombreuses activités humaines, qu'elles soient périphériques comme, par exemple, le déboisement des terres pour l'agriculture et le développement urbain, ou *in situ* comme la création de canaux de drainage, la coupe forestière et l'horticulture (Laine et al., 1995; Bouchard et Domon, 1997 ; Minkinen et al., 1999 ; Frankl et Schmeidl, 2000; Freléchoux et al., 2000; Talbot et al., 2010; Pasquet et al., 2015; Pellerin et al., 2016a; Poulin et al., 2016).

Une des principales conséquences des diverses activités humaines sur les tourbières est un abaissement du niveau de la nappe phréatique pouvant causer un assèchement de la tourbe en surface. En effet, le drainage des terres périphériques à des fins agricoles ou d'urbanisation de même que la création de canaux de drainage peuvent diminuer le niveau d'eau. Les conditions du sol devenant plus sèches, les processus de formation et d'accumulation de la matière organique peuvent alors ralentir, voire même cesser en raison des nouvelles conditions aérobiques créées. Les tourbières ne sont alors plus des écosystèmes fonctionnels accumulateurs de tourbe et peuvent ainsi se transformer en source de carbone vers l'atmosphère (Frolking et al., 2011) Les conditions plus sèches peuvent aussi engendrer des modifications importantes de la structure et de la composition du cortège floristique tourbicole. L'un de ces changements les plus manifestes est le développement accéléré, au XX<sup>e</sup> siècle, de la couverture forestière, notamment chez les tourbières isolées au sein d'une matrice paysagère agricole. Certaines espèces arborescentes habituellement peu présentes dans les tourbières peuvent alors s'installer et même devenir envahissantes pour mener à leur boisement graduel en raison de l'aération de la zone racinaire (Prévost et al., 1997). Par effet de rétroaction, une présence plus abondante d'arbres viendra du même coup amplifier l'assèchement de la tourbe puisqu'ils interceptent les eaux de pluie, en plus d'augmenter l'évapotranspiration (Sarkkola et al., 2010, Limpens et al., 2014). Ce phénomène de boisement est présentement observé dans diverses régions tempérées de l'est de l'Amérique du Nord (p. ex. : Pellerin et Lavoie, 2003a; 2003b; Ireland et Booth, 2012 ; Pasquet et al., 2015 ; Pellerin et al., 2016a; Beauregard et al., sous presse) et de l'Europe (p. ex. : Frankl et Schmeidl 2000; Freléchoux et al., 2000; Linderholm et Leine, 2004; Cubizolle et al.,

2009). Il survient aussi dans certaines régions boréales, comme par exemple en Alaska (Berg et al., 2009), mais, dans ce dernier cas, il serait plutôt d'origine climatique.

### Le boisement ancien ou naturel des tourbières

Des travaux paléoécologiques menés en Europe ont montré qu'il arrive que les tourbières puissent présenter naturellement un couvert forestier relativement dense, non seulement par des espèces conifériennes, mais aussi par des espèces feuillues. Une synthèse à ce sujet a été produite récemment par Edvardsson et al. (2016). De nombreuses souches de pins datant entre 4000 et 4500 ans A.A. (avant aujourd'hui) ont été trouvées dans la tourbe en Écosse (Birks, 1975) et dans le nord de l'Allemagne. Ces épisodes boisés ont été interprétés comme étant une transition, dans le développement des tourbières, de conditions minérotrophes vers l'établissement de conditions ombrotrophes (Eckstein et al., 2011). Pour leur part, Edvardsson et al. (2012) ont découvert la présence de nombreux pins durant une période d'environ 1600 ans, soit entre 8100 et 6500 ans A.A. dans la stratigraphie des tourbes du sud de la Suède. Ces exemples démontrent que les pins peuvent coloniser naturellement les tourbières en Europe. De plus, des recherches effectuées en Allemagne, aux Pays-Bas, en Irlande et dans le sud de la Suède ont montré la présence de souches fossiles de chênes datant de quelques milliers d'années dans des tourbières ombrotrophes. Les plus vieilles souches trouvées à ce jour datent de 8000 ans (Leuschner et al., 2002; Edvardsson et al., 2014). Dans tous les cas mentionnés, les anciennes phases forestières sur tourbe ont été associées à des conditions hydrologiques moins humides à la surface des tourbières dues à un climat plus sec (Birks, 1975; Leuschner et al., 2002; Eckstein et al., 2011; Edvardsson et al., 2012; 2014; 2016).

Aux États-Unis, quelques chercheurs ont étudié des peuplements forestiers de composition peu fréquente sur tourbe établis avant le XX<sup>e</sup> siècle. En effet, Lyon (1949) s'est penché sur les facteurs qui influençaient la croissance radiale des individus d'une population de pin blanc (*Pinus strobus*) en Pennsylvanie, certains d'entre eux datant de la décennie 1870. Dans cette étude, la croissance du pin est expliquée par un système racinaire déployé en surface, moins sujet aux variations de la nappe phréatique. Forrester et al. (2005) ont, quant à eux, étudié la structure d'âge et les volumes de débris ligneux grossiers d'une ancienne forêt coniférienne faisant partie d'un milieu humide dans l'État de New York. Ils ont recensé des individus de pin blanc de plus de 400 ans, ainsi que d'autres espèces, comme le thuya occidental (*Thuja occidentalis*), de plus de 200 ans. Une légère augmentation de la régénération des arbres a coïncidé avec l'amorce de la colonisation humaine des terres avoisinantes

au début des années 1800. Une population relique sur tourbe a été étudiée dans la zone naturelle de Bear Meadows en Pennsylvanie (Abrams et al., 2001). Le peuplement est principalement composé de thuya occidental, d'épinette noire (*Picea mariana*), d'érable rouge (*Acer rubrum*), de bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*), de pin blanc, de nyssa sylvestre (*Nyssa sylvatica*) et de sapin baumier (*Abies balsamea*). C'est l'une des rares tourbières dans l'est de l'Amérique du Nord qui a permis d'étudier les peuplements forestiers sur tourbe avant l'influence de la colonisation européenne. Au sein de ce peuplement, on trouve des individus de nyssa sylvestre établis depuis 1560, de thuya occidental depuis 1700, de bouleau jaune depuis 1740 et d'érable rouge depuis 1770. Ce peuplement d'origine naturelle a été l'objet de grandes pressions suite aux exploitations forestières à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et des feux de forêt.

### Les tourbières du sud du Québec

Au Québec, les milieux humides couvrent environ 12,5 % du territoire (Pellerin et Poulin, 2013). C'est dans les régions boréales, notamment dans le domaine bioclimatique de la pessière à mousses, qu'elles occupent les plus vastes superficies. Plus au sud en région tempérée dans les domaines bioclimatiques des érablières, on trouve aussi de nombreux milieux humides, notamment des tourbières, mais de plus petites superficies que celles des régions boréales. Plusieurs de ces tourbières sont ombrotrophes, c'est-à-dire qu'elles sont approvisionnées en eau et en éléments minéraux exclusivement par les précipitations (pluie, neige). Les tourbières ombrotrophes (appelées aussi bogs) sont donc des écosystèmes plus pauvres et plus acides que les tourbières minérotrophes (appelées aussi fens) qui, elles, reçoivent des apports minéraux par les eaux de ruissellement. Étant des écosystèmes plus acides que les fens, les bogs ont une diversité floristique plus réduite. Dans la région physiographique des basses-terres du Saint-Laurent, plusieurs bogs sont caractérisés par une section centrale dominée par une strate arbustive comprenant différentes espèces d'éricacées (p. ex. : *Chamaedaphne calyculata*, *Ledum groenlandicum*, *Vaccinium corymbosum*) sur un tapis de sphaignes. Si certaines tourbières sont dépourvues d'arbres, d'autres hébergent des espèces arborescentes, mais généralement de faible hauteur. Il s'agit essentiellement de l'épinette noire et du mélèze laricin (*Larix laricina*). Leur densité et leur taille sont toutefois très variables d'une tourbière à l'autre. Ainsi, certaines tourbières ombrotrophes présentent une structure semi-forestière alors que d'autres ont une structure forestière et un couvert forestier relativement dense (Couillard et Grondin, 1986; Glaser et Janssens, 1986). La bordure des tourbières ombrotrophes (lagg) est généralement

dominée par une végétation arborescente de type minérotrophe. L'épinette noire et le mélèze y sont encore présents, mais d'autres espèces peuvent aussi être abondantes comme le thuya occidental, le sapin baumier et l'érable rouge (Couillard et Grondin 1986 ; Payette et Rochefort, 2001 ; Ott et Chimner, 2016). Dans le cas particulier du sud-ouest du Québec, le mélèze laricin et l'épinette noire se sont toutefois grandement raréfiés au sein des tourbières depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle en raison de la coupe forestière. En effet, selon les actes notariés de l'époque, les ventes de bois ont commencé au début des années 1800 avec des espèces telles que le chêne à gros fruits (*Quercus macrocarpa*) et le pin blanc. L'érable à sucre (*Acer saccharum*), le bouleau jaune et le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia*), vendus comme bois de chauffage dans les années 1820-1830, ont été graduellement remplacés dans les décennies suivantes par d'autres essences également utilisées pour le bois de chauffage, comme l'épinette noire et le mélèze (Bouchard et al, 1989; Simard et Bouchard 1996; Bouchard et Domon, 1997; Brisson et Bouchard, 2003), ce qui a entraîné une diminution notable de leur abondance sur le territoire (Meilleur et al., 1994).

L'une des premières conséquences des activités humaines sur les tourbières du sud du Québec concerne le fait qu'elles se fragmentent et que leurs superficies ont grandement diminué. À cet effet, certains chercheurs estiment que de 60 à 80 % des milieux humides seraient disparus depuis l'arrivée des premiers colons européens (Payette et Rochefort, 2001; Poulin et al., 2016). Depuis, les nombreuses pressions anthropiques demeurent toujours importantes. Récemment, pour la seule période comprise entre 1990 et 2011, c'est 567 km<sup>2</sup> de milieux humides dans les basses-terres qui furent perturbés à divers degrés ou sont disparus définitivement (Pellerin et Poulin, 2013). Au sein du bassin versant de la rivière Bécancour, les tourbières ont été fortement perturbées de 1966 à 2010 par des activités irréversibles telles que la culture de canneberges qui ont mené à la perte de 4033 ha de tourbière (Avard et al., 2013). Dans la région administrative de la Montérégie, au sud-ouest du Québec, plusieurs tourbières ont vu leur superficie diminuée au profit de terres agricoles (Bouchard et Jean, 2001). L'agriculture céréalière ou maraîchère, la construction de routes et de bâtiments sont des causes de pertes considérables de superficie de tourbières. Ces activités entraînent des modifications importantes de l'hydrologie et de la dynamique des tourbières, ce qui peut ultimement mener à leur disparition.

L'assèchement de la tourbe en surface peut aussi engendrer des modifications rapides de la composition de la flore tourbicole. Une plus grande couverture arborescente favorisera une

augmentation des espèces vasculaires tolérantes à l'ombre tout en diminuant le recouvrement des sphaignes (Laine et al., 1995 ; Frankl et Schmeidl, 2000 ; Linderholme et Laine, 2004). Par exemple, à la tourbière de la base de plein air de Sainte-Foy, au sein de la municipalité de la ville de Québec, Blanchard et al. (2018) ont comparé la composition floristique de plusieurs placettes d'échantillonnage entre 1978 et 2015. Cette tourbière a connu une nette augmentation de sa richesse spécifique de l'ordre de 152 %. Toutefois, cette augmentation est due à l'implantation d'espèces associées à des habitats forestiers, incluant des espèces exotiques, au détriment de celles de milieux humides. La représentation d'espèces tourbicoles héliophiles, comme *Chamaedaphne calyculata* et *Sphagnum magellanicum*, a beaucoup diminué. Il faut toutefois mentionner que d'autres facteurs peuvent aussi influencer les changements qui surviennent au sein du cortège floristique des tourbières, comme par exemple, l'augmentation des dépôts azotés (Gunnarson et al., 2002 ; Rion et al., 2018).

Le phénomène de boisement accéléré des tourbières est particulièrement important dans la région physiographique des basses-terres du Saint-Laurent, là où la population, les activités anthropiques et les pressions sur les tourbières sont les plus importantes. Les quelques études effectuées à ce jour dans cette région, surtout à partir de l'analyse de photographies aériennes, indiquent qu'il s'agit d'un phénomène qui aurait été particulièrement marqué à partir du milieu du XX<sup>e</sup> siècle (Pellerin et Lavoie, 2003a; Pasquet et al., 2015; Pellerin et al., 2016a; 2016b; Beauregard et al., sous presse). Parmi les principales espèces arborescentes impliquées, il y a le bouleau gris (*Betula populifolia*) et l'érable rouge. Certaines tourbières du Bas-Saint-Laurent ont aussi été caractérisées par une afforestation marquée par le pin gris (*Pinus banksiana*) entre 1920 et 1945. Son établissement a été relié à des épisodes de feux et à des conditions climatiques plus sèches. En effet, les graines de pin ont pu profiter du sol qui a été dépourvu de son tapis de sphaignes suite au passage du feu (Pellerin et Lavoie, 2003b). Il faut toutefois mentionner que le processus de densification des arbres au sein d'une tourbière peut aussi se faire par l'intermédiaire de l'épinette noire et du mélèze. En effet, l'étude de Pellerin et Lavoie (2003a) a démontré, entre autres, par des analyses dendrochronologiques ainsi que l'analyse de photographies aériennes, que plusieurs tourbières du Bas-Saint-Laurent ont connu une densification de leur couvert forestier par l'épinette noire entre 1948 et 1995, ce qui représente une augmentation de 137 ha de forêt. C'est aussi le cas du complexe des tourbières de Lanoraie, au nord-est de Montréal, où deux secteurs ont connu un boisement majeur par ces espèces. De 1933 à 2012, la superficie occupée par la forêt a augmenté de 170 ha pour ces deux secteurs (Pellerin et al., 2016a).

En ce qui concerne spécifiquement le bouleau gris, une espèce de début de succession écologique qui forme de nombreux peuplements sur tourbe en Montérégie, Beaugard et al. (sous presse) ont montré notamment grâce à des analyses dendrochronologiques qu'il avait commencé à coloniser les tourbières dans les années 1950, mais que son déploiement avait surtout été significatif à partir de la décennie 1980. Dans chacun des sites étudiés, sa prolifération a fait suite à un feu fort probablement d'origine humaine (Jean et Bouchard, 1987; Beaugard et al., sous presse). La présence de macrorestes de bouleau gris uniquement dans les premiers centimètres à la surface de la tourbe laisse penser qu'une telle abondance de cet arbre, comme c'est le cas aujourd'hui, est un phénomène unique dans l'histoire des tourbières de l'est de l'Amérique du Nord (Lavoie et Pellerin, 2015). Le cas de la tourbière ombrotrophe du mont Saint-Bruno illustre très bien le processus de boisement accéléré survenant au sein des basses-terres : en 1964, seulement 16 % de la superficie (24 ha) de la tourbière présentait une structure forestière alors qu'en 2013, soit 50 ans plus tard, la tourbière était complètement boisée et ce, essentiellement par le bouleau gris. Ceci représente une augmentation de 125 ha de superficies boisées (Pellerin et al., 2016b). Les tourbières Small et Large Tea Fields dans la région du Haut-Saint-Laurent ont aussi connu une forte augmentation de leur couverture forestière, celle-ci passant de 26 à 51 % de leur superficie totale en l'espace de seulement 27 ans (1983 à 2010). Cette augmentation représente une expansion de plus de 280 ha de forêt (Pasquet et al., 2015). Généralement, les études qui ont porté sur le phénomène de boisement des tourbières reposent sur l'analyse de photographies aériennes multidates (les plus anciennes photos datant de la décennie 1930), la dendrochronologie et l'analyse macrofossile de tourbe de surface (p. ex. : Pellerin et Lavoie, 2003b; Cubizolle et al., 2009; Ireland et Booth, 2012; Pellerin et al., 2016a; 2016b; Beaugard et al., sous presse). Dans certains cas, des analyses de thécamoebiens ont aussi montré un abaissement de la nappe phréatique associé à la densification du couvert forestier (van der Linden et al., 2008 ; Talbot et al., 2010 ; Ireland et Booth, 2012 ; Pellerin et al., 2016a ; 2016b).

Présentement, à ma connaissance, les analyses paléoécologiques menées sur les tourbières de l'est de l'Amérique du Nord n'ont jamais montré qu'il y ait eu, dans le passé, des épisodes densément boisés semblables à ceux recensés en Europe, c'est-à-dire par des espèces autres que l'épinette noire, le mélèze laricin ou le thuya occidental. De plus, en ce qui concerne spécifiquement le sud du Québec, il y a encore peu d'informations disponibles concernant l'âge des peuplements forestiers sur tourbe à l'aide de la dendrochronologie (Pellerin et Lavoie, 2003a; 2003b; Lavoie, 2017; Beaugard et al., sous presse). Par exemple, Lavoie (2017) s'est penché particulièrement sur l'établissement et la croissance

du pin blanc pour cinq tourbières des basses-terres du Saint-Laurent. La présence de cette espèce en milieu tourbeux semble aussi être un phénomène relativement récent, la colonisation ayant débuté au plus tôt vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Cette installation concorde avec la présence de macrorestes de l'espèce dans les seuls premiers centimètres de la tourbe en surface. Les quelques travaux concernant la paléoécologie des tourbières à l'aide de l'analyse macrofossile en Montérégie (Lavoie et al., 1995; 2013), au nord de Montréal (Muller et al., 2003) et plus à l'est (Larouche, 1979; Lavoie et al., 2012; Pilote et al., 2018) n'ont pas non plus montré la présence ancienne de conifères moins fréquents de tourbières, comme le pin blanc ou la pruche du Canada (*Tsuga canadensis*), ou d'espèces feuillues comme l'érable rouge, le bouleau gris ou le bouleau jaune.

La tourbière de Saint-Georges-de-Clarenceville, au sud-ouest du Québec en Montérégie (45° 02' 31.4"N; 73° 14'07.4"O), est une vaste tourbière forestière couvrant une superficie de plus de 1200 ha isolée dans une matrice paysagère agricole, comportant à la fois des portions ombrotrophes et minérotrophes. On y trouve plusieurs espèces arborescentes, soit des peuplements feuillus généralement « non typiques » de tourbières, qui côtoient des peuplements conifériens. Parmi les espèces les plus abondantes, il y a chez les espèces feuillues l'érable rouge, le bouleau jaune et le frêne noir (*Fraxinus nigra*). Chez les espèces conifériennes, de très grands individus de pin blanc et de pruche du Canada sont présents, de même que le thuya occidental et l'épinette noire. Dans quelques secteurs, on trouve de grosses souches de pin blanc dans un état de décomposition avancé ; celles-ci laissent penser, a priori, que la présence du pin sur la tourbière et, du même coup, des autres espèces arborescentes serait beaucoup plus ancienne que ce qui a été documenté à ce jour dans les régions tempérées du Québec. C'est dans ce contexte que j'ai réalisé une étude des peuplements forestiers de la tourbière afin de tenter de répondre aux questions suivantes : de quand datent les peuplements forestiers actuels ? À quels facteurs est due leur origine ? Est-il possible de retracer une succession écologique au sein des forêts sur tourbe ?

## Objectifs et hypothèses

L'objectif général de ce projet était de décrire et d'expliquer la dynamique contemporaine (XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles) et à plus long terme (quelques milliers d'années) des peuplements forestiers de la tourbière de Saint-Georges-de-Clarenceville. Plus précisément, j'ai tenté de :



- 1) Dresser un portrait des peuplements forestiers pour les 100 à 200 dernières années à l'aide de la dendrochronologie.
- 2) Retracer la dynamique à long terme de quelques peuplements, sur une échelle de temps de quelques millénaires, à l'aide de l'identification botanique de bois fossiles enfouis dans la tourbe.
- 3) Déterminer si l'établissement et la dynamique subséquente des peuplements forestiers que nous observons aujourd'hui sont d'origine anthropique ou naturelle.

L'hypothèse que j'ai testée est que la tourbière était autrefois colonisée naturellement par des peuplements forestiers à dominance coniférienne « communes » des tourbières comme le mélèze laricin et l'épinette noire. En raison de perturbations anthropiques *in situ*, telles que la coupe forestière et le creusement de canaux de drainage, ces espèces auraient été graduellement remplacées par des peuplements arborescents à dominance feuillue, principalement l'érable rouge, et par des conifères moins fréquents dans de tels écosystèmes comme le pin blanc. L'hypothèse alternative est que la tourbière comporte, depuis très longtemps, des peuplements mixtes comme ceux présents aujourd'hui de façon naturelle. Dans un tel cas, les perturbations humaines ne seraient pas en cause dans leur origine.

# **Chapitre 1 : Transformation des peuplements forestiers d'une vaste tourbière du sud du Québec sous l'influence des activités anthropiques des 200 dernières années : quelle essence est la gagnante ?**

## **1.1 Résumé**

Au cours du XX<sup>e</sup> siècle, les activités anthropiques ont fortement influencé la dynamique des tourbières. Ainsi, on trouve de plus en plus de peuplements forestiers mixtes sur tourbe dans l'est de l'Amérique du Nord. Cette étude porte sur une vaste tourbière dans le sud-ouest de la région physiographique des basses-terres du Saint-Laurent (Québec) qui est caractérisée par la présence de différents types de peuplements forestiers, notamment des peuplements feuillus dominés par l'érable rouge qui côtoient des peuplements conifériens, certains d'entre eux comportant du pin blanc. Ce projet avait pour objectifs 1) de dresser un portrait des peuplements forestiers de la tourbière pour les 100 à 200 dernières années, 2) de retracer leur dynamique à plus long terme, soit sur quelques millénaires et 3) de déterminer si l'établissement et la dynamique de la végétation forestière actuelle est d'origine anthropique ou naturelle. L'hypothèse qui a été testée est que la tourbière était autrefois colonisée naturellement par des peuplements forestiers à dominance coniférienne communs aux tourbières avec le mélèze laricin et l'épinette noire. En raison de perturbations anthropiques *in situ*, telles que la coupe forestière et le creusement de canaux de drainage, ces espèces auraient été graduellement remplacées par des peuplements arborescents à dominance feuillue, principalement l'érable rouge, et par des conifères moins fréquents dans de tels écosystèmes comme le pin blanc. La datation et l'identification botanique de bois enfouis dans la tourbe et de souches montrent que la présence du mélèze laricin, de l'épinette noire, du thuya occidental et du pin blanc est très ancienne (>3000 ans). L'installation d'espèces feuillues comme l'érable rouge et le bouleau jaune menant à la formation de peuplements forestiers mixtes actuels aurait débuté vers la moitié du XIX<sup>e</sup> siècle suite à l'amorce de l'occupation du territoire. Des perturbations anthropiques *in situ*, essentiellement la coupe forestière à petite échelle, seraient à l'origine d'un changement important dans la dynamique forestière, celle-ci passant d'un couvert forestier coniférien d'origine naturelle vers une dynamique caractérisée de plus en plus par des espèces feuillues. La tourbière devrait éventuellement devenir majoritairement colonisée par des érablières rouges.

Mots-clés : Bois fossile, Coupe forestière, Écologie végétale, Érable rouge, Milieu humide, Perturbations, Pin blanc, Tourbière forestière

## 1.2 Introduction

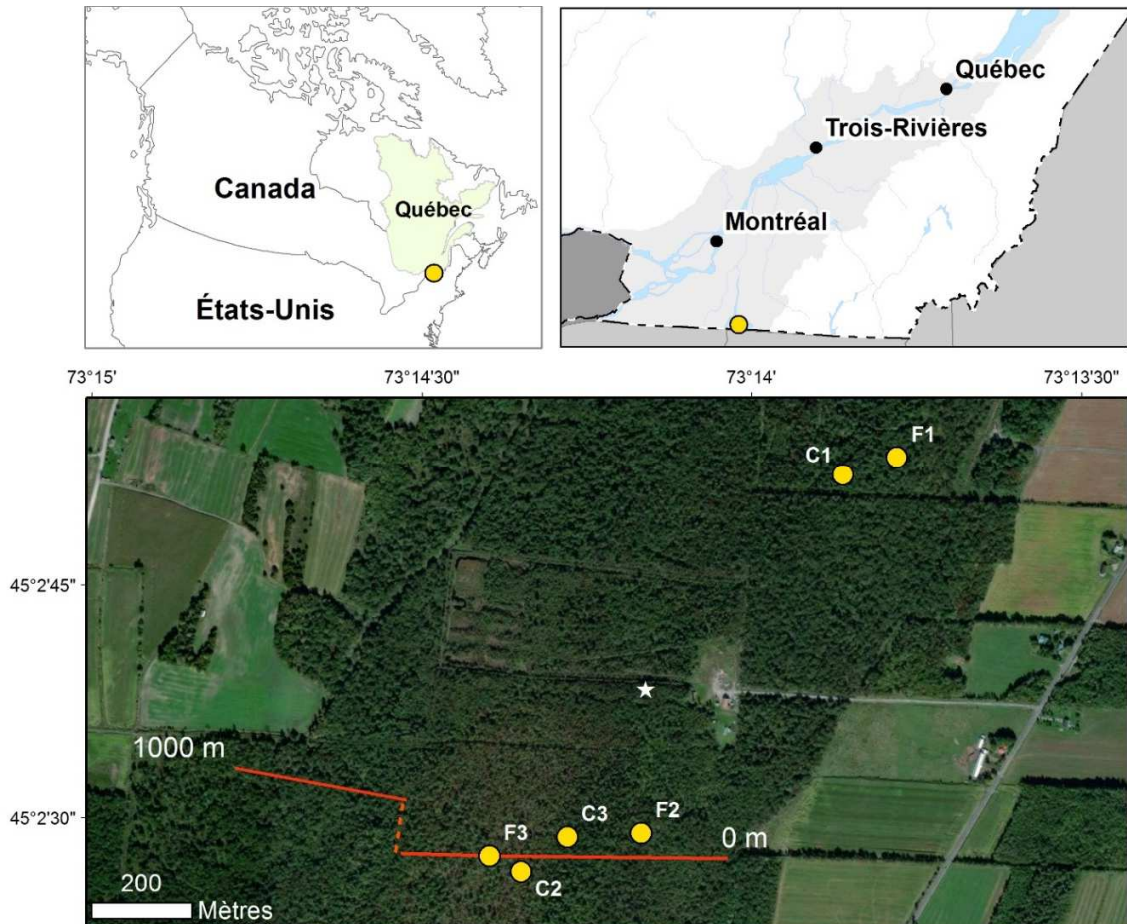
Les tourbières ombrotrophes et minérotrophes des régions tempérées de l'est de l'Amérique du Nord peuvent présenter une structure forestière coniférienne relativement dense dominée, entre autres, par l'épinette noire (*Picea mariana*), le mélèze laricin (*Larix laricina*) ou encore le thuya occidental (*Thuja occidentalis*). Toutefois, un aspect particulier concerne la présence, souvent importante, de peuplements mixtes sur tourbe. On observe en effet de plus en plus d'espèces feuillues comme l'érable rouge (*Acer rubrum*), le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*) et le bouleau gris (*Betula populifolia*), de même que certaines espèces conifériennes moins fréquentes dans ces écosystèmes tels le pin blanc (*Pinus strobus*), la pruche du Canada (*Tsuga canadensis*) ou encore l'épinette rouge (*Picea rubens*) (Moizuk et Livingston, 1966; Jean et Bouchard 1987; Swinehart et Parker, 2000; Abrams et al., 2001; Ireland et Booth, 2012; Fortney et al., 2015; Pasquet et al., 2015; Beauregard et al., sous presse). Puisque les tourbières sont l'objet depuis plusieurs décennies de perturbations anthropiques *in situ* et *ex situ* comme le drainage, la coupe forestière et le reboisement, l'extraction de la tourbe, l'agriculture et l'urbanisation (Laine et al., 1995; Ireland et Booth, 2012; Connolly et Holden 2013; O'Connell et al., 2014; Talbot et al., 2010; Pasquet et al., 2015; Poulin et al., 2016), ces perturbations ont souvent été invoquées pour expliquer l'installation de nouvelles espèces et le processus de boisement accéléré au XX<sup>e</sup> siècle touchant plusieurs tourbières, notamment celles isolées au sein d'une matrice paysagère agricole et ce, autant dans l'est de l'Amérique du Nord qu'en Europe (Freléchoux et al., 2000; Pellerin et Lavoie, 2003a; 2003b; Linderholm et Leine, 2004 ; Cubizolle et al., 2009; Ireland et Booth, 2012; Pellerin et al., 2016a; Ratcliffe et al., 2017). En effet, elles peuvent avoir pour conséquences d'abaisser le niveau de la nappe phréatique, d'assécher les conditions à la surface de la tourbe et, subséquemment, d'engendrer des changements importants de la composition et de la structure de la végétation tourbicole. D'autres facteurs peuvent néanmoins contribuer aux transformations de la flore tourbicole, comme le climat (Pellerin et Lavoie 2003b; Heijmans et al., 2013) ou encore les apports éoliens de fertilisants agricoles (Berendse et al., 2001; Rion et al., 2018).

En Europe, de nombreuses souches fossiles de pin (*Pinus* spp.) et de chêne (*Quercus* spp.) ont été découvertes dans la stratigraphie des tourbes (Birks, 1975; Leuschner et al., 2002; Eckstein et al., 2011; Edvardsson et al., 2012; 2014; 2016). Il arrive donc que les tourbières puissent présenter naturellement un couvert forestier relativement dense, non seulement par des espèces conifériennes, mais aussi par des espèces feuillues. Ces anciennes phases forestières ont été interprétées comme

étant le reflet de conditions hydrologiques moins humides à la surface de la tourbe lors de périodes climatiques plus sèches. Bien que certaines tourbières de l'est de l'Amérique du Nord hébergent présentement des individus vivants relativement âgés (quelques siècles) de pin blanc ou de pruche par exemple (Lyon, 1949; Abrams et al., 2001; Forrester et al., 2005) et que l'érable rouge et le bouleau gris soient en pleine expansion au sein des milieux humides (Golet et al., 1993; Warren et al., 2004; Beauregard et al., sous presse), les études paléoécologiques n'ont pas encore, à notre connaissance, montré la présence d'anciens épisodes densément boisés par de telles espèces dans l'histoire des tourbières.

Dans le sud du Québec (Canada), la région physiographique des basses-terres du Saint-Laurent couvre une superficie de 30 677 km<sup>2</sup> (Figure 1), dont 9.5% consistent en des milieux humides (Pellerin et Poulin, 2013). Cette région caractérisée par une topographie relativement plane et par la présence de dépôts argileux comportait autrefois une plus grande abondance de milieux humides, notamment de grandes tourbières, qui sont disparues en raison du développement des terres agricoles et de l'urbanisation (Bouchard et Domon, 1997; Bouchard et Jean, 2001; Avard et al., 2013; Poulin et al., 2016). Dans la portion sud-ouest du territoire, on trouve plusieurs peuplements forestiers mixtes sur tourbe (Couillard et Grondin, 1986; Belvisi et Beaulieu, 2008) dominés notamment par l'érable rouge et le bouleau gris, certains d'entre eux ayant connu une expansion marquée au XX<sup>e</sup> siècle (Jean et Bouchard 1987; Pasquet et al., 2015; Pellerin et al., 2016b; Beauregard et al., sous presse). En contrepartie, l'épinette noire et le mélèze laricin y sont aujourd'hui peu abondants, car ils furent massivement exploités à partir du milieu du XIX<sup>e</sup> siècle comme source de bois de chauffage (Simard et Bouchard 1996; Brisson et Bouchard, 2003).

La tourbière de Saint-Georges-de-Clarenceville dans le sud-ouest du Québec (Figure 1) est une vaste tourbière forestière ceinturée de terres agricoles. Elle héberge divers peuplements forestiers feuillus et conifériens, notamment de grandes érablières rouges. Selon les endroits, l'érable rouge est accompagné du bouleau jaune, du thuya occidental, du pin blanc, de la pruche du Canada ou encore du frêne noir. De nombreuses souches d'arbre sont présentes, entre autres d'énormes souches de pin blanc dans un état de décomposition avancé (Figure 2), ce qui suggère une présence relativement ancienne de cette espèce sur la tourbière. Dans ce contexte, cette étude avait pour but de décrire et d'expliquer la dynamique contemporaine (XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles) et à plus long terme (quelques milliers d'années) des peuplements forestiers de cette tourbière.



**Figure 1:** Localisation du territoire à l'étude à l'échelle nationale (A-Canada), régionale (B-région physiographique des basses-terres du Saint-Laurent au Québec, en gris) et locale (C- tourbière de Saint-Georges-de-Clarenceville au sud-ouest du Québec). Les points jaunes indiquent la localisation des peuplements forestiers (sites) étudiés. Le trait rouge illustre le transect d'une longueur de 1000 m où des travaux furent menés. L'étoile représente l'emplacement d'un tronc de pin blanc enfoui ayant été daté au  $^{14}\text{C}$ .



**Figure 2:** Exemple d'une souche de pin blanc en état de décomposition avancée située près du site F2.

Plus spécifiquement, les objectifs étaient *i)* de dresser un portrait de quelques peuplements forestiers pour les 100 à 200 dernières années à l'aide de la dendrochronologie, *ii)* de retracer leur dynamique à plus long terme, soit sur une échelle de temps de quelques millénaires à l'aide de l'analyse de bois de taille macroscopique enfouis dans la tourbe, et *iii)* de déterminer jusqu'à quel point l'établissement et la dynamique contemporaine des peuplements étudiés sont liés aux activités anthropiques, notamment la coupe forestière. L'hypothèse qui a été testée était que la tourbière fut autrefois colonisée naturellement par des peuplements à dominance coniférienne « typiques » des tourbières comme le mélèze laricin et l'épinette noire. En raison de perturbations anthropiques *in situ*, telles que la coupe et le creusement de canaux de drainage, ces espèces auraient été remplacées par des peuplements arborescents à dominance feuillue, principalement l'érable rouge, et par des conifères moins fréquents dans de tels écosystèmes comme le pin blanc et la pruche du Canada.

## 1.3 Méthodes

### 1.3.1 Site d'étude

La tourbière de Saint-Georges-de-Clarenceville couvre une superficie de 1200 ha dans le sud-ouest du Québec au sein des basses-terres du Saint-Laurent (Figure 1). La région fait partie du domaine bioclimatique de l'érablière à caryer cordiforme, qui est le domaine de végétation le plus diversifié du Québec (Brisson, 2009). Parmi les espèces arborescentes caractéristiques de ce domaine, il y a l'érable à sucre (*Acer saccharum*), le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia*) et le caryer cordiforme (*Carya cordiformis*). La température moyenne annuelle se situe entre 5.4 et 6.6°C. Les précipitations annuelles atteignent entre 960 et 1300 mm, tandis que le nombre de degrés-jour au-dessus de 5°C varie selon les années de 2000 à 2250 (Environnement Canada, 2016). Le secteur de la tourbière à l'étude (45° 02' 31.4"N; 73° 14'07.4"O) comporte à la fois des portions minérotrophes et ombrotrophes. Il est entièrement forestier et composé de peuplements mixtes comportant des espèces conifériennes (*Thuja occidentalis*, *Picea mariana*, *Pinus strobus*, *Tsuga canadensis*) et feuillues (*Acer rubrum*, *Betula alleghaniensis*, *Fraxinus nigra*). La tourbe atteint jusqu'à 7,5 m d'épaisseur et elle est très décomposée en surface. La sphaigne est très peu abondante, voire même absente à plusieurs endroits. Quelques canaux de drainage parsèment la tourbière. De nombreuses souches d'arbres témoignent de coupes antérieures (Figure 2). Le village de Saint-Georges-de-Clarenceville et ses terres avoisinantes, anciennement appelé la seigneurie de Foucault, semble avoir été peu habité jusqu'au début du XIX<sup>e</sup> (Lussier, 2004). Les cartes de l'époque montrent que la tourbière fût entièrement divisée en lot et habitée par les premiers colons à partir de 1829 (Têtu, 1829; Vaughan, 1840).

### 1.3.2 Travaux sur le terrain

Le long d'un transect d'une longueur de 1000 m traversant la tourbière selon un axe est-ouest (Figure 1), un profil de la topographie de la surface de la tourbière a été réalisé à l'aide d'un altimètre *Zipllevel pro-2000* (Technidea Corporation). À tous les 25 m d'intervalle, un relevé de végétation sommaire des espèces ligneuses et une mesure de l'épaisseur de la tourbe jusqu'au sol minéral à l'aide de tiges métalliques ont été effectués. La seconde section du transect entre les points 625 et 1000 m a dû être décalée d'environ 100 m par rapport à la première section (0-625 m) en raison de la présence d'une dune de sable végétalisée.

Six peuplements forestiers (appelés sites) représentatifs et distincts sur le plan des espèces arborescentes dominantes ont été étudiés (Figures 1 et 3) : trois peuplements à dominance feuillue (sites F1, F2, F3) et trois peuplements à dominance coniférienne (sites C1, C2, C3). Quatre d'entre eux (F2, F3, C2, C3) se situent à proximité du transect. Deux autres peuplements (F1, C1), localisés à environ 800 m au nord-est du transect, ont aussi été choisis, car ils présentent une composition forestière différente de celles présentes le long du transect.

Pour chacun des sites, les travaux ont été effectués au sein d'une placette d'échantillonnage de 400 m<sup>2</sup> (20 m × 20 m). Dans chacune des placettes, toutes les tiges ligneuses ayant un diamètre à hauteur poitrine (DHP) supérieure à 1 cm, mortes ou vivantes, ont été recensées et mesurées à l'aide d'un pied à coulisse. Lorsque le nombre le permettait, au moins 15 individus de chaque espèce arborescente furent échantillonnés à l'aide d'une sonde de Pressler le plus près possible du collet pour déterminer leur âge minimal. Dans le cas particulier de l'érable rouge, un tel échantillonnage n'a pas toujours été possible, car plusieurs individus avaient un tronc creux. C'est pourquoi des galettes ont aussi été récoltées à partir de souches d'érable rouge en bon état de conservation au sein ou dans le secteur avoisinant les sites d'étude. Le nombre d'individus échantillonnés au sein de chacun des sites varie de 24 à 77. Un dénombrement de la régénération (DHP <1cm) et des semis appartenant aux espèces arborescentes a été mené à l'intérieur de microplacettes (4 m<sup>2</sup>) juxtaposées le long de deux transects perpendiculaires traversant la placette (Méthot et al., 2014). Un relevé de la végétation (espèces arbustives et herbacées, bryophytes) a aussi été réalisé et l'abondance de chacune des espèces a été exprimée en pourcentage de recouvrement par rapport à la superficie totale de la placette. Le mètre supérieur du dépôt de tourbe a été récolté au centre de la placette à l'aide d'un carottier russe (Jowsey, 1966) afin d'examiner, en laboratoire, le contenu en charbons de bois et décrire qualitativement la composition de la matrice de la tourbe. Les sédiments organiques ont été emballés dans une pellicule plastique et du papier d'aluminium pour leur transport au laboratoire. Enfin, une excavation (~1 m × 2 m × 1.50 m) a été menée dans les sites F1 et C1 afin de récolter les pièces de bois de taille macroscopique préservées dans la tourbe. Celles-ci ont été prélevées par tranches de 10 cm d'épaisseur à partir du sommet du dépôt. Les six sites à l'étude étant localisés au sein de propriétés privées, l'autorisation pour mener de telles excavations ne fut accordée que pour la propriété où se trouvent les sites F1 et C1.





**Figure 3:** Photos des six sites étudiés. F1 : bétulaie jaune à érable rouge ; F2 : érablière rouge à frêne noir et bouleau jaune ; F3 : érablière rouge à pin blanc ; C1 : prucheraie à pin blanc et érable rouge ; C2 : pinède blanche à érable rouge ; C3 : Sapinière à érable rouge.

Plusieurs énormes souches d'arbre dans un état de décomposition avancé et s'apparentant a priori au pin blanc sont présentes dans le secteur du site F2 (Figure 2), un secteur où on ne trouve aujourd'hui aucun individu vivant de cette espèce. Dans le but d'estimer quelle pouvait être auparavant la densité du pin blanc à cet endroit, un recensement des souches a été fait au sein d'une superficie de 1 ha. Chaque souche a été géoréférencée et un échantillon de bois a été prélevé pour identification botanique en laboratoire. À des fins de comparaison relativement à l'abondance de pin blanc croissant présentement dans la tourbière, un dénombrement des individus vivants de cette espèce fût aussi effectué sur une superficie de 1 ha dans le secteur du point 450 m du transect, là où la densité du pin est aujourd'hui la plus élevée. Enfin, une galette basale d'un très gros individu de pin blanc, couché au sol et relativement bien conservé à proximité du site F2, a aussi été récoltée pour une analyse dendrochronologique (Annexe 1).

### 1.3.3 Travaux en laboratoire

Les carottes récoltées à la sonde de Pressler ont d'abord été séchées puis montées sur des supports en bois. Les carottes et les galettes ont ensuite été sablées finement afin de permettre une meilleure lecture des cernes de croissance à la loupe binoculaire (40×). Tous les échantillons ont été datés. En ce qui concerne les galettes d'érable rouge prélevées à partir de souches, l'âge des individus n'a pas pu être déterminé par interdatation puisque les échantillons n'étaient pas en assez bon état pour permettre la mesure des cernes. Ainsi, leur âge minimal a été déterminé en considérant qu'ils furent coupés, par le propriétaire de la parcelle, un ou deux ans après un verglas ayant eu lieu en 1998 (J.P. Vézina, communication personnelle). L'analyse de la galette de l'individu de pin blanc au sol a été effectuée par interdatation avec une série de référence de pin blanc au Québec (Parc de la Mauricie; Marchand et Filion, 2014). Pour ce faire, les mesures de la largeur de cernes (précision de 2 µm) de cet échantillon ont été effectuées à l'aide d'une loupe binoculaire et d'un micromètre (Velmex). Afin de rendre les valeurs comparables entre elles, une standardisation par lissage des données a été faite à l'aide d'une fonction spline cubique avec une fenêtre à 67 % (Cook, 1985 et Cook et al., 1990). L'interdatation a été réalisée avec le logiciel Cofecha qui s'appuie sur la corrélation statistique des échantillons (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001).

Les échantillons de bois récoltés dans les excavations des sites F1 et C1 ont été séchés à l'air libre. Lorsque leur nombre et leur état de conservation le permettaient, jusqu'à 10 échantillons en bon état ont été choisis aléatoirement pour chaque tranche de 10 cm d'épaisseur de tourbe. Les échantillons

des souches récoltés près du site F2 ont également été séchés à l'air libre. Tous les échantillons de bois ont été taillés en pièces d'environ 1 cm<sup>3</sup> en vue de leur identification botanique au microscope. Les identifications ont été réalisées au niveau du genre ou de l'espèce à partir de critères anatomiques du bois (Jacquiot, 1955; Schweingruber, 1990) et de la collection de référence des bois du Centre d'études nordiques (CEN) de l'Université Laval (Québec).

Une description qualitative des principales composantes de la matrice de la tourbe ainsi que le dénombrement des charbons de bois de taille macroscopique ont été effectués pour chacun des sites à partir de la carotte de tourbe d'un mètre d'épaisseur prélevée à l'aide du carottier russe. Suite au tamisage d'un échantillon d'un volume de quelques centimètres cubes à tous les 10 cm d'intervalle, la tourbe a été décrite en fonction des catégories suivantes : tourbe de sphaignes, tourbe d'herbacées et tourbe de bois. Des sous-échantillons de volume de 1 cm<sup>3</sup> ont été prélevés à tous les 4 cm le long des carottes pour le dénombrement des charbons de bois. Ils ont été tamisés sous un jet d'eau à travers un tamis de 300 µm. Cette taille de tamis a été choisie pour récupérer des charbons ayant été produits lors de feux *in situ* (Ohlson et Tryterud, 2000; Asselin et Payette, 2005).

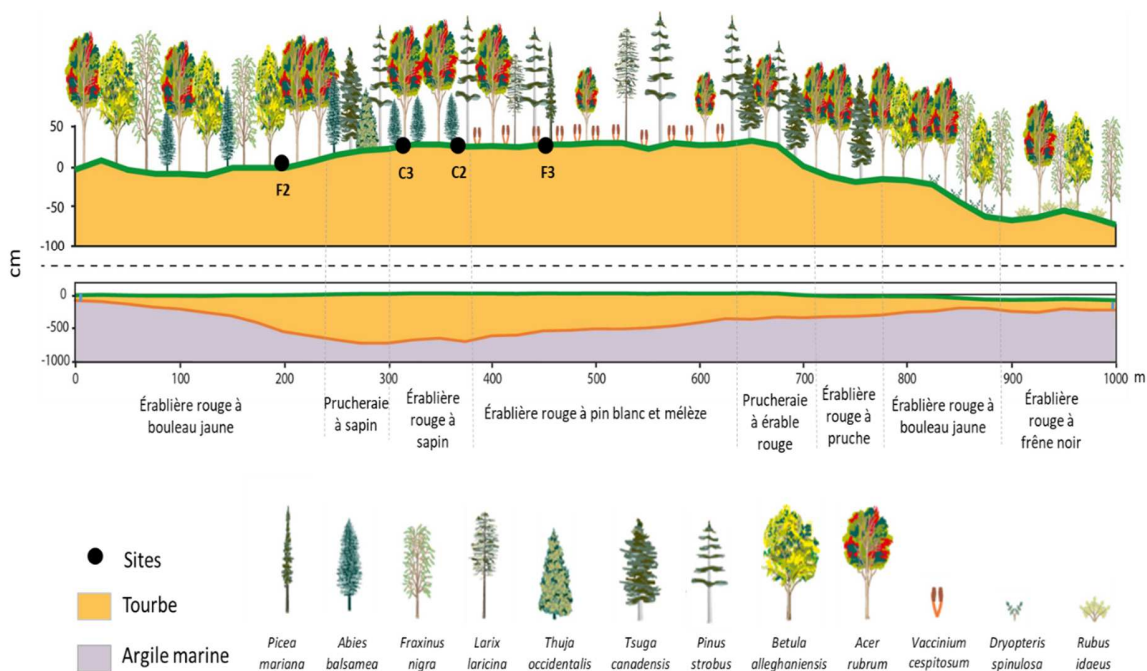
#### 1.3.3.4 Datation radiocarbone

Neuf échantillons de bois ont été datés par spectrométrie de masse par accélérateur (SMA) aux laboratoires de radiochronologie du CEN de l'Université Laval (préparation des échantillons) et au Keck Carbon Cycle AMS Facility à l'Université de Californie (Irvine, États-Unis; datation des échantillons). Sept échantillons proviennent des excavations des sites F1 et C1, un échantillon provient d'une souche de pin blanc près du site F2 et un autre d'un tronc de pin blanc enfoui à environ 1.50 m de profondeur à 300 m au nord du site F2; ce tronc fut extrait antérieurement par le propriétaire du terrain lors du creusement d'un canal de drainage (Figure 1; Annexe 2). Les âges obtenus du laboratoire en années conventionnelles (années <sup>14</sup>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.

## 1.4 Résultats

### 1.4.1 Dynamique actuelle des peuplements forestiers

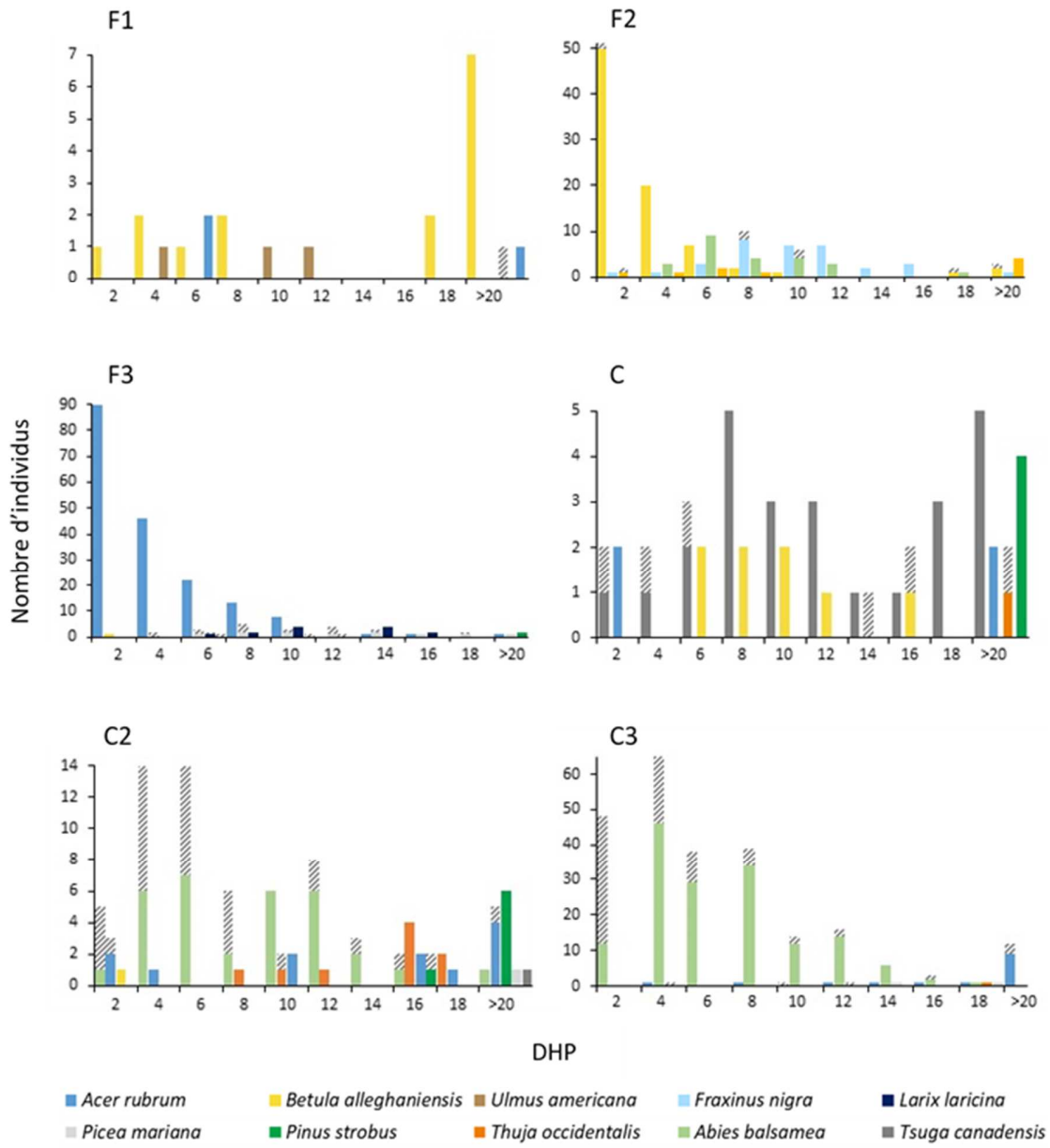
Dans la portion transversale de la tourbière où le transect d'une longueur de 1000 m a été positionné, l'épaisseur de la matière organique varie de 80 à 750 cm selon les endroits, celle-ci reposant sur de l'argile marine (Figure 4). La surface de la tourbière présente un léger bombement dans sa portion plus centrale (stations 250 à 700 m du transect). Dans les 200 à 300 premiers mètres en bordure de la tourbière, aux deux extrémités du transect, les conditions sont minérotrophes et les espèces arborescentes sont surtout des feuillus avec quelques espèces conifériennes. Les peuplements forestiers sur tourbe minérotrophe consistent essentiellement en des érablières rouges, l'érable rouge étant accompagné selon le cas par le bouleau jaune, le frêne noir, le thuya occidental ou le sapin baumier (*Abies balsamea*). La pruche du Canada est aussi dominante à certains endroits où elle forme des prucheraies. Les érablières rouges caractérisent aussi les peuplements forestiers de la section centrale ombrotrophe, mais l'abondance des espèces conifériennes (sapin baumier, pin blanc, mélèze laricin, épinette noire, thuya occidental) est beaucoup plus élevée et la couverture arborescente y est moins dense que sur tourbe minérotrophe. La strate arbustive de la végétation ombrotrophe montre un couvert relativement dense et continu de *Vaccinium corymbosum*.



**Figure 4:** Profil topographique de la surface de la tourbière et peuplements forestiers présents le long du transect d'une longueur de 1000 m traversant la tourbière selon un axe est-ouest.

#### 1.4.1.1 Les peuplements à dominance feuillue (sites F1, F2, F3)

Le site F1 est une bétulaie jaune à érable rouge sur tourbe minérotrophe. La végétation au sol est dense et largement dominée par *Impatiens capensis* (Annexe 3). On y trouve aussi *Dryopteris spinulosa*, *Matteucia struthiopteris* et *Rubus idaeus*. Il s'agit du site ayant la plus faible surface terrière (17.12 m<sup>2</sup>/ha; Tableau 1) et la plus faible diversité chez les arbres (trois espèces : *Betula alleghaniensis*, *Acer rubrum*, *Ulmus americana*). Le DHP des individus varie uniformément de 2 à 32 cm (Figure 5). Seul un individu d'érable rouge possède un diamètre plus élevé (44 cm). Au total, 24 individus ont été datés. Le plus vieux (bouleau jaune) s'est établi en 1933 (Figure 6). Le bouleau jaune, qui est l'espèce dominante (surface terrière = 11.72 m<sup>2</sup>/ha), montre deux principales périodes d'installation, dont l'une est très récente (1940-1949; 1980-1989). Pour leur part, les plus vieux érables rouges et ormes d'Amérique (*Ulmus americana*) datent de la période 1940-1949. Malgré son abondance locale, le bouleau jaune montre une faible régénération, celle-ci étant nettement dominée par l'érable rouge (Tableau 1). Aucune autre espèce n'a été trouvée au sein de la régénération.



**Figure 5:** Structure de taille des peuplements forestiers (diamètre hauteur de poitrine ; DHP) des six sites étudiés. Les bandes hachurées correspondent aux individus morts.

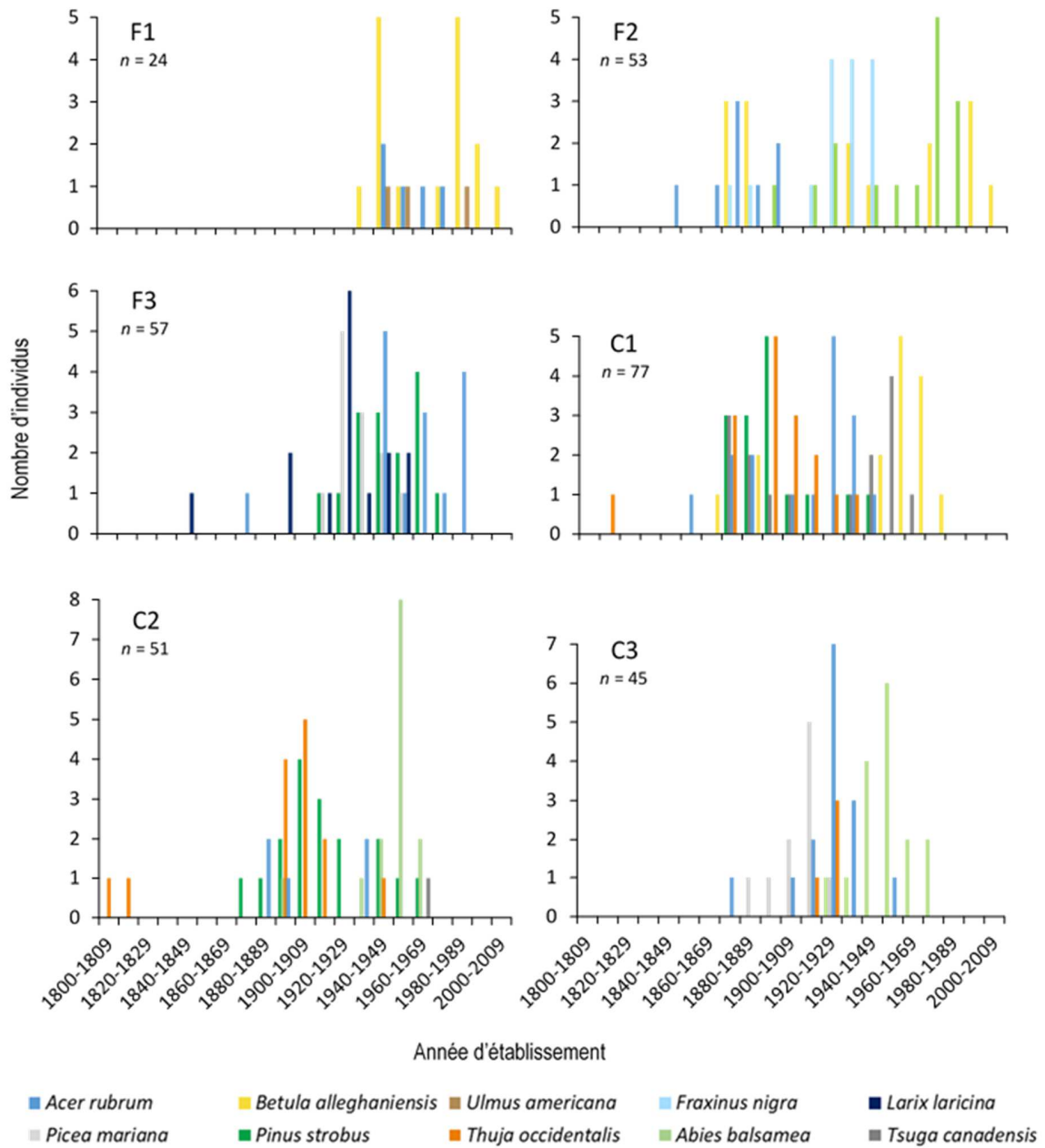


Figure 6: Dates d'établissement des espèces arborescentes des six sites étudiés.

**Tableau 1:** Nombre d'individus, surface terrière (m<sup>2</sup>/ha) et régénération (nombre d'individus/ha) des sites à l'étude.

Site	<i>Acer rubrum</i>	<i>Betula alleghaniensis</i>	<i>Fraxinus nigra</i>	<i>Larix laricina</i>	<i>Picea mariana</i>	<i>Pinus strobus</i>	<i>Thuja occidentalis</i>	<i>Abies balsamea</i>	<i>Tsuga canadensis</i>	Autres	Arbres morts	Total
Nombre*												
F1	3	15	0	0	0	0	0	0	0	3(1)**	1	22
C1	4	8(1)	0	0	0	3	1(2)	0	26(3)	0	6	48
F2	9(1)	83(3)	0	0	0	0	0	24(2)	0	0	8	157
C2	12(2)	1	0	0	1	7(1)	9(3)	32(27)	1	0	33	96
F3	182	1	0	13(4)	11(13)	2	0	0	0	0	17	226
C3	15(4)	0	0	0	2(1)	0	1(1)	156(74)	0	0	80	255
Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha)												
F1	3.94	11.72	0	0	0	0	0	0	0	0.51	0.95	17.12
C1	4.33	1.57	0	0	0	17.94	0.95	0	22.28	0	2.76	49.83
F2	11.11	5.15	7.84	0	0	0	0	3.50	0	0	2.37	29.97
C2	9.29	0.01	0	0	0.79	23.90	3.89	5.87	1.54	0	6.28	51.55
F3	8.75	0.01	0	3.65	3.69	4.27	0	0	0	0	3.27	23.64
C3	14.19	0	0	0	1.02	0	0.64	18.13	0	0	8.51	42.49
Régénération (nombre/ha)												
F1	1354	104	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
C1	16354	1875	0	0	0	104	0	0	11354	0	-	-
F2	1146	3021	208	0	0	0	0	208	0	208**	-	-
C2	1304	978	0	0	543	8261	0	26196	2391	0	-	-
F3	59135	0	0	0	0	769	0	0	0	96***	-	-
C3	72115	769	0	0	0	962	192	62788	0	96***	-	-

\*Nombre d'individus morts entre parenthèses, \*\**Ulmus americana*, \*\*\**Fagus grandifolia*, \*\*\*\**Quercus* sp.

Le site F2 est une érablière rouge à frêne noir et bouleau jaune sur tourbe minérotrophe qui comporte aussi du sapin baumier. La végétation du sol comprend notamment *Onoclea sensibilis* et *Rubus pubescens* (Annexe 3). Il s'agit du seul site où le frêne noir est présent. L'érable rouge possède la valeur de surface terrière la plus élevée (11.11 m<sup>2</sup>/ha; Tableau 1). Seuls quelques individus ont un DHP supérieur à 20 cm, les plus gros étant des érables rouges (>40 cm). Sur les 83 bouleaux jaunes recensés, il y en a 70 qui ont un diamètre inférieur à 4 cm (Figure 5). Les dates obtenues pour les érables rouges montrent toutes un établissement au courant du XIX<sup>e</sup> siècle, le plus vieil individu (mort) datant de 1846. Pour leur part, les premiers individus de frêne noir et de bouleau jaune ont pris naissance dans les années 1870, mais le frêne s'est surtout développé dans les années 1920-1940 (Figure 6). La régénération est dominée par le bouleau jaune et l'érable rouge (Tableau 1).

Le site F3 est une érablière rouge à pin blanc, épinette noire et mélèze sur tourbe ombrotrophe. Le sol est densément recouvert par les sphaignes et il y a une présence abondante de *Vaccinium corymbosum* et de *Coptis trifolia* (Annexe 3). Il s'agit du site présentant le plus grand nombre d'individus vivants (209), la majorité (86 %) étant des érables rouges ayant un DHP inférieur à 10 cm (Figure 5). Les plus gros individus sont deux pins blancs, tandis que les plus vieux individus sont un mélèze (1849) et un érable rouge (1877 ; Figure 6). Les autres espèces ont colonisé le site après 1910, surtout à



partir de la décennie 1920 pour le mélèze et le pin blanc. Quant à lui, l'érable rouge s'est fortement déployé à partir de la décennie 1940. La presque totalité de la régénération est d'ailleurs composée d'érable rouge (Tableau 1).

#### 1.4.1.2 Les peuplements à dominance coniférienne (sites C1, C2, C3)

Le site C1 est une prucheraie à pin blanc et érable rouge sur tourbe minérotrophe. On y trouve aussi du bouleau jaune et du thuya occidental. L'espèce la plus abondante au sol est *Dryopteris spinulosa* qui côtoie plusieurs autres espèces, entre autres *Oclemena acuminata*, *Mitchella repens* et *Viola blanda* (Annexe 3). La pruche du Canada (22.28 m<sup>2</sup>/ha) et le pin blanc (17.94 m<sup>2</sup>/ha) ont les surfaces terrières les plus élevées (Tableau 1). Le DHP des individus varie de 2 à 60 cm. La pruche et le bouleau dominent les classes de diamètre < 20 cm tandis que les plus gros individus (>40 cm) sont des pins et des pruches (Figure 5). Les plus vieux individus sont un thuya occidental (1813) et un érable rouge (1856). L'établissement des autres espèces, notamment la pruche et le pin blanc, s'est amorcé à partir de 1870. L'érable rouge a aussi poursuivi son installation dans les décennies 1870 et 1880. Le premier individu de bouleau jaune a colonisé le site durant la période 1860-1869, mais l'espèce s'est surtout développée à partir des années 1940 (Figure 6). L'érable rouge et la pruche dominent nettement la régénération (Tableau 1).

Le site C2 est une pinède blanche à érable rouge et sapin sur tourbe minérotrophe. La surface de la tourbe est recouverte d'un tapis d'aiguilles de pin où il est possible d'apercevoir quelques individus de *Dryopteris spinulosa*, *Matteucia struthiopteris* et *Coptis trifolia* (Annexe 3). C'est le site qui montre la plus grande densité forestière (surface terrière = 51.55 m<sup>2</sup>/ha). Il comprend 63 individus vivants (*Pinus strobus*, *Acer rubrum*, *Abies balsamea*, *Thuja occidentalis*, *Tsuga canadensis*, *Betula alleghaniensis*) ainsi que 33 tiges mortes. L'érable rouge et le pin blanc ont les plus grands diamètres (32 à 52 cm), tandis que le sapin domine les classes de diamètre inférieures à 16 cm, bien que plusieurs individus soient morts (Figure 5). Le plus vieil individu, qui est aussi le plus vieux de l'ensemble des sites, est un thuya occidental datant de 1809. Un autre thuya s'est établi en 1813, tandis que l'établissement des autres individus de cette espèce date de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et du début du XX<sup>e</sup> siècle. Les pins blancs ont débuté leur colonisation en 1874 et les érables rouges en 1883. Pour ce qui est du sapin baumier, son établissement est plus récent, la plupart des individus datant de la décennie 1950. C'est le sapin qui domine fortement la régénération (Tableau 1).

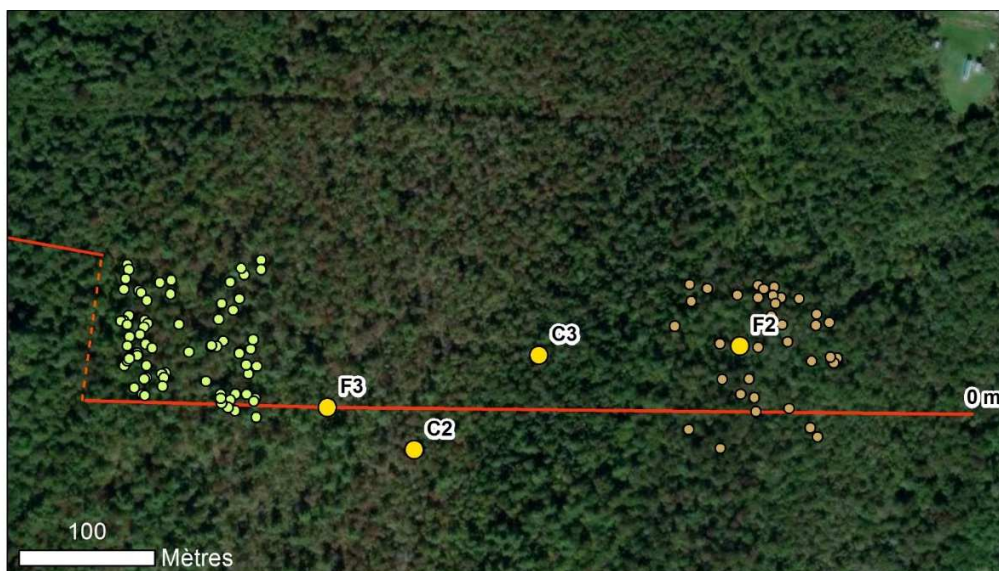
Le site C3 est une sapinière à érable rouge et épinette noire sur tourbe minérotrophe. Le sol est généralement recouvert de sphaignes et on observe la présence de *Coptis trifolia*, *Osmundastrum cinnamomeum* et *Clintonia borealis* au sein de la strate herbacée (Annexe 3). Malgré que la majorité des sapins baumiers aient un faible diamètre (<16 cm), ils forment une strate inférieure relativement dense et dominant ainsi la surface terrière (Figure 5; Tableau 1). L'érable rouge surpasse le sapin en hauteur, mais sa surface terrière est moindre (Tableau 1). Ce site comporte le plus grand nombre d'individus morts et vivants réunis (254). Il est aussi celui affichant la mortalité la plus élevée (31.5% des individus; Tableau 1), celle-ci étant fortement marquée pour les individus de sapin. Les plus grands diamètres (30 à 38 cm) sont représentés par l'érable rouge (Figure 5). L'érable rouge est l'espèce la plus ancienne chez les individus échantillonnés (1878), suivie de l'épinette noire (1888) et du thuya occidental (1916). Bien qu'il soit aujourd'hui dominant sur le site, le sapin baumier a proliféré plus tardivement, surtout à partir de 1930. En ce qui concerne la régénération, elle est grandement dominée par l'érable rouge et le sapin. C'est d'ailleurs le site ayant le plus grand nombre de semis de ces deux espèces (Tableau 1).

#### 1.4.2 Dynamique à long terme des peuplements forestiers

Sur l'hectare cartographié près du site F2, 34 souches et un tronc au sol ont été échantillonnés pour identification botanique. Sur la base de leurs caractéristiques anatomiques, ils ont tous été identifiés comme étant du pin blanc (Figure 7). En contrepartie, aucun pin blanc vivant n'est présent aujourd'hui au sein du secteur cartographié. À titre de comparaison, il y a présentement 72 individus vivants de cette espèce sur une même superficie aux environs de la station 450 m du transect (Figure 7). L'interdatation du tronc de pin blanc au sol (Annexe 1) avec une série de référence au nord de la partie centrale des basses-terres du Saint-Laurent au Québec (Marchand et Filion, 2014) a permis de dater la formation de son premier cerne à l'année 1557. L'individu aurait vécu un minimum de 281 ans et serait mort peu après 1837.

Au total, 168 bois fossiles extraits des excavations des sites C1 et F1 ont été identifiés botaniquement, soit 78 pour le site C1 et 90 pour le site F1 (Tableau 2). Toutes les pièces identifiées consistent en des conifères, surtout des bois de *Larix laricina*/*Picea* sp. présents dans tous les niveaux (69 % des échantillons pour C1, 89 % des échantillons pour F1). Dix pièces de pin blanc et 21 de thuya occidental ont aussi été identifiées. Dans le cas du pin blanc, 9 des 10 pièces proviennent du site C1 aux

profondeurs 0-10, 10-20 et 90-100 cm. Une seule pièce a été trouvée au site F1, entre 50 et 60 cm de profondeur. Les bois de thuya occidental furent trouvés en proportion égale dans les deux sites.



**Figure 7:** Localisation des souches de pin blanc recensées au sein d'une superficie de 1 ha à proximité du site F2 (points beiges) et des individus vivants de pin blanc au sein d'une superficie équivalente près du point 450 m du transect (points verts).

**Tableau 2:** Dénombrement et identification botanique des fragments de bois récoltés dans la tourbe au sein des excavations des sites C1 et F1.

Site et profondeur (cm)	<i>Larix laricina</i> <i>Picea</i> sp.	<i>Pinus</i> <i>strobus</i>	<i>Thuja</i> <i>occidentalis</i>
C1			
0-10	1	4	-
10-20	1	1	-
20-30	9	-	1
30-40	7	2	1
40-50	10	-	-
50-60	4	-	-
60-70	7	-	3
70-80	2	-	2
80-90	1	-	2
90-100	2	2	6
100-110	10	-	-
F1			
0-10	1	-	-
10-20	10	-	-
20-30	9	-	-
30-40	8	-	1
40-50	5	-	3
50-60	1	1	8
60-70	3	-	2
70-80	9	-	1
80-90	10	-	-
90-100	7	-	1
100-110	10	-	-

Neuf échantillons ont fait l'objet d'une datation  $^{14}\text{C}$ , dont sept étaient des bois de *Larix laricina/Picea* sp. et de *Pinus strobus* préservés dans la tourbe des sites F1 et C1 (Tableau 3). Les deux échantillons de *Larix laricina/Picea* sp. récoltés à la base des deux excavations ont livré des âges médians de 5790 (F1, 100-110 cm) et 3350 ans A.A (C1, 110-120 cm). Les cinq pièces de *Pinus strobus* proviennent de deux époques distinctes : les âges s'échelonnent entre 3460 et 3290 ans A.A. pour les trois échantillons les plus anciens (C1, 90-100 cm de profondeur et F1, 50-60 cm de profondeur), et entre 290 et 200 ans A.A. pour les deux échantillons les plus récents (C1, 30-40 cm de profondeur). Il est possible que les deux dates similaires obtenues à la profondeur 90-100 cm du site C1 proviennent d'un même individu. Une souche de pin blanc près du site F2 (Figure 2) a livré un âge de 470 ans A.A. Enfin, un tronc de la même espèce, trouvé à environ 1.50 m de profondeur à 300 m au nord de F2 (Figure 1; Annexe 2), a été daté à 3120 A.A., soit un âge similaire à celui des bois les plus anciens de cette espèce dans les excavations.

**Tableau 3:** Données chronologiques ( $^{14}\text{C}$ ).

Site et profondeur (cm)	Numéro de Laboratoire***	Matériel daté	Profondeur (cm)	Âge $^{14}\text{C}$	Intervalle $2\sigma$ (années AA)	Âge median (années AA)
C1 – 30-40	UCIAMS-210529 ULA-8134	<i>Pinus strobus</i> bois	30-40	235 ± 15	283-303	290
C1 – 30-40	UCIAMS-210530 ULA-8135	<i>Pinus strobus</i> bois	30-40	150 ± 15	170-224	200
C1 – 90-100	UCIAMS-210531 ULA-8136	<i>Pinus strobus</i> bois	90-100	3225 ± 15	3396-3470	3430
C1 – 90-100	UCIAMS-210532 ULA-8137	<i>Pinus strobus</i> bois	90-100	3245 ± 15	3442-3484	3460
C1 – 110-120	UCIAMS-210533 ULA-8138	<i>Larix laricina/Picea</i> sp. bois	110-120	3105 ± 15	3323-3375	3350
F1 – 50-60	UCIAMS-210534 ULA-8139	<i>Pinus strobus</i> bois	50-60	3070 ± 15	3230-3350	3290
F1 – 100-110	UCIAMS-210535 ULA-8140	<i>Larix laricina/Picea</i> sp. bois	100-110	5100 ± 20	5753-5826	5790
Souche*	UCIAMS-210537 ULA-8142	<i>Pinus strobus</i> bois	-	375 ± 15	432-499	470
Tronc enfoui**	UCIAMS-210536 ULA-8141	<i>Pinus strobus</i> bois	150	2955 ± 15	3067-3169	3120

\*Souche de pin blanc située près du site F2; \*\*Tronc de pin blanc enfoui à 1.50 m de profondeur à 300 m du site F2; \*\*\*UCIAMS : University Irvine; ULA : Université Laval

Pour chacun des sites, la tourbe du mètre supérieur du dépôt (0-100 cm) est très décomposée, notamment dans les premiers centimètres en surface (Annexe 4). La matrice de la tourbe consiste surtout en des restes d'herbacées. Celle des sites F1 et F2 comportent des restes de bois (F1 : 20-100 cm; F2 : 30-100 cm). Une tourbe à dominance de sphaignes caractérise la partie supérieure du dépôt du site F3 (0-48 cm) et le site C3 (10-88 cm); il s'agit d'ailleurs des deux seuls sites où de la sphaigne est aujourd'hui présente au sol. Aucun horizon carbonisé n'était visible dans les carottes de tourbe, et aucun charbon de bois de taille macroscopique ne fut trouvé dans la tourbe des sites F3, C1 et C2. Quelques charbons de petite taille ont été recensés dans les sites F1, F2 et C3, surtout à F2 où il y en a dans trois niveaux entre 48 et 72 cm de profondeur (Annexe 4).

## 1.5 Discussion

Cette étude fournit de nouvelles connaissances relatives à l'origine et la dynamique successionale des forêts sur tourbe dans les basses-terres du Saint-Laurent au Québec. En effet, les travaux réalisés à ce jour sur les peuplements forestiers des tourbières ont surtout été menés dans l'optique de reconstituer le processus de développement spatio-temporel du boisement accéléré des tourbières ombrotrophes au XX<sup>e</sup> siècle, surtout par l'entremise de l'analyse de photographies aériennes (Pellerin et Lavoie 2003a ; Pasquet et al., 2015 ; Pellerin et al., 2016a ; 2016b ; Beauregard et al., sous presse). Toutefois, puisque les plus anciennes photographies aériennes datent des années 1930, elles ne livrent pas ou peu d'informations sur l'âge des peuplements, à l'exception des tourbières qui étaient entièrement dépourvues d'arbres sur les plus anciennes photographies. En outre, les quelques données dendrochronologiques disponibles portent sur des espèces en particulier comme le bouleau gris (Beauregard et al., sous presse), le pin blanc (Lavoie, 2017) ou encore le pin gris (*Pinus banksiana*) (Pellerin et Lavoie, 2003b) et non sur l'ensemble des espèces composant les peuplements, de sorte que nous ne connaissons pas ou peu la dynamique successionale s'opérant au sein de ceux-ci. Nos résultats suggèrent que la tourbière de Saint-Georges-de-Clarenceville héberge des peuplements mixtes relativement denses depuis longtemps, et qu'ils ont une dynamique régie par des perturbations anthropiques *in situ*, essentiellement la coupe forestière à petite échelle, fort probablement depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle.

### 1.5.1 La dynamique à long terme des peuplements forestiers sur tourbe

Les analyses dendrochronologiques de même que les identifications botaniques des souches d'arbre et des bois enfouis dans la tourbe ont permis de dresser un portrait général de la composition forestière d'un secteur de la tourbière avant l'amorce de l'occupation humaine du territoire. La plus ancienne date obtenue parmi les fragments de bois extraits des excavations de la tourbe des sites F1 et C1 provient d'un bois de *Larix laricina/Picea* sp. à la base du site F1 (5790 ans A.A.). Parmi les 168 pièces identifiées, 158 (94 %) consistent en des pièces de *Larix laricina/Picea* sp. et de *Thuja occidentalis*. Le mélèze laricin et l'épinette noire sont aujourd'hui absents des deux sites. Ceci suggère que les secteurs des sites F1 et C1 ont longtemps été caractérisés par la présence de peuplements à dominance essentiellement coniférienne, que le mélèze et l'épinette sont disparus récemment, et que les espèces feuillues présentes aujourd'hui à ces endroits (*Acer rubrum*, *Betula alleghaniensis*) de même que *Tsuga canadensis* (dans le cas du site C1) se seraient aussi installées récemment, fort probablement après le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle (voir section suivante). Toutefois, les analyses paléoécologiques n'ayant porté que sur l'identification des bois, nous ne pouvons exclure la possibilité que ces espèces fussent totalement absentes du cortège floristique. Une analyse macrofossile détaillée (p. ex.: graines, feuilles, etc.) de carottes de tourbe permettrait de vérifier cette possibilité.

La présence locale du pin blanc sur la tourbière a aussi été démontrée il y a plus de 3000 ans A.A. grâce à l'analyse des bois enfouis. Bien que certaines tourbières hébergent aujourd'hui de vieux individus de cette espèce de l'ordre de quelques siècles (Lyon, 1949; Abrams et al., 2001; Forrester et al., 2005), les études paléoécologiques dans l'est de l'Amérique du Nord n'ont jamais montré, à notre connaissance, la présence passée du pin blanc sur les tourbières, outre des macrorestes ou une augmentation de sa représentation pollinique seulement dans les premiers centimètres à la surface de la tourbe dans les sites où le pin blanc est aujourd'hui présent (Bunting et al., 1998 ; Ireland et Booth, 2012 ; Lavoie 2017). En contrepartie, des tourbières en Europe ont hébergé du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) de façon relativement abondante pendant leur histoire. Ces épisodes boisés ont été associés à un climat plus sec ayant mené à des conditions moins humides à la surface de la tourbe (Birks, 1975; Eckstein et al., 2011; Edvardsson et al., 2012; 2016; Krapiec et Szychowska-Krapiec, 2016).

La présence de nombreuses souches de pin blanc, dont plusieurs sont dans un état de décomposition avancé, témoignent de leur ancienneté. Les datations <sup>14</sup>C d'échantillons de pin (fragments de bois et

tronc enfouis dans la tourbe, souche) ainsi que l'analyse dendrochronologique d'un tronc au sol sont tous des éléments qui indiquent que le pin blanc est présent de façon naturelle et de manière continue sur la tourbière depuis au moins 3000 ans. Les 34 souches recensées près du secteur du site F2 suggèrent une densité passée semblable à celle observée aujourd'hui près du point 450 m du transect où l'espèce est aujourd'hui la plus abondante sur la tourbière. Les souches représentent d'anciens individus qui furent probablement coupés dans les années 1800 ou au début des années 1900. Bien qu'il soit difficile d'estimer quelle fut l'étendue du peuplement de pin blanc sur la tourbière à l'époque précoloniale, sa présence passée dans deux peuplements distincts à plus de 800 mètres l'un de l'autre (F2 et C1) milite en faveur du fait qu'il fut probablement aussi, sinon peut-être même plus abondant qu'aujourd'hui.

### 1.5.2 La dynamique contemporaine des peuplements forestiers : naturelle ou anthropique ?

Les premiers individus arborescents, encore vivants aujourd'hui, qui se sont installés dans les sites à l'étude sont des thuyas occidentaux présents depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle (sites C1 et C2). Aucun autre individu échantillonné ne s'est installé jusqu'en 1840, année durant laquelle le mélèze laricin (site F3) et l'érable rouge (site F2) ont graduellement débuté leur colonisation. Ce n'est qu'environ 40 ans plus tard, vers 1880, que trois des six sites (C1, C2 et F2) ont connu une importante colonisation, autant par des espèces confériennes (*Thuja occidentalis*, *Pinus strobus*, *Tsuga canadensis*) que par des espèces feuillues (*Acer rubrum*, *Betula alleghaniensis*, *Fraxinus nigra*). Un patron similaire de colonisation a aussi été observé au site Bear Meadows en Pennsylvanie où un fort recrutement est survenu dans les années 1890, celui-ci ayant été associé à une coupe sélective (Abrams et al., 2001). Très peu d'individus encore vivants ont colonisé les sites F1, F3 et C3 au XIX<sup>e</sup> siècle. Ces peuplements se sont plutôt développés à partir des années 1920 où l'on remarque une expansion de l'érable rouge. Dans la majorité des sites, le recrutement s'est intensifié au courant du XX<sup>e</sup> siècle. Enfin, c'est pendant la période 1940-1959 qu'il y a eu un fort recrutement pour l'ensemble des espèces, plus particulièrement chez le sapin baumier, le bouleau jaune et l'érable rouge. En effet, 25 % de tous les arbres échantillonnés sont originaires de cette période.

Nous estimons que l'origine des peuplements actuellement observés dans la tourbière étudiée aurait débuté vers 1840 avec, notamment, les coupes forestières qui auraient favorisé le développement de l'érable rouge et la possible transformation de peuplements à dominance coniférienne (mélèze laricin,

épinette noire) vers des peuplements mixtes. Le territoire de la municipalité de Saint-Georges-de-Clarenceville, nommé autrefois la seigneurie de Foucault, fut colonisé par les premiers habitants au début du XIX<sup>e</sup> siècle (Lussier, 2004). À cette époque, la forte demande pour le pin blanc a mené à son exploitation massive entre les années 1820 et 1840 dans la partie sud-ouest des basses-terres du Saint-Laurent (Bouchard et al., 1989 ; Simard et Bouchard, 1996 ; Bouchard et Domon, 1997). Considérant que la tourbière est séparée en lots privés depuis 1829 (Têtu, 1829 ; Vaughan, 1840), que des souches de pin blanc sont encore présentes aujourd'hui et qu'il y a une absence complète de tronc de cette espèce en décomposition au sol, il est raisonnable de conclure que ces individus furent récoltés par les différents propriétaires des lots. L'épinette noire était aussi grandement exploitée et vendue à des fins de bois de chauffage entre les années 1849 et 1857, de sorte que de nombreuses coupes ont eu lieu sur des tourbières (Bouchard et Simard, 1996 ; Brisson et Bouchard, 2003). Ceci expliquerait sa faible présence actuelle à la tourbière de Saint-Georges-de-Clarenceville comparativement à la situation qui prévalait avant la colonisation européenne. L'épinette noire est d'ailleurs aujourd'hui relativement peu présente dans la portion sud-ouest des basses-terres du Saint-Laurent (Meilleur et al., 1994). Enfin, l'époque des plus anciens érables rouges vivants (1840) à la tourbière de Saint-Georges-de-Clarenceville concorde sensiblement à celle des coupes documentées.

Étant toujours fractionnée en plusieurs lots privés, en plus d'être ceinturée de terres agricoles, la tourbière a été et est toujours l'objet de pressions anthropiques qui ont pu, au fil du temps, modifier sa superficie, ses conditions hydrologiques en surface et la dynamique des peuplements au courant du XX<sup>e</sup> siècle (Frankl et Schmeidl, 2000; Freléchoux et al, 2000; Talbot et al, 2010). Récemment, quelques canaux drainage ont aussi été creusés. Ces facteurs ont peut-être contribué, dans certains secteurs de la tourbière, à une accélération du processus de boisement au XX<sup>e</sup> siècle comme cela fut documenté pour d'autres tourbières des régions tempérées de l'est de l'Amérique du Nord (Pellerin et Lavoie, 2003a; 2003b ; Pellerin et al., 2016a ; 2016b ; Talbot et al., 2010; Pasquet et al., 2015) et de l'Europe (Laine et al., 1995; Frankl et Schmeidl, 2000; Freléchoux et al, 2000; Linderholme et Laine, 2004). Par contre, les études ayant examiné les impacts du drainage indiquent que ses effets se font ressentir sur une distance d'au plus 200 m dans certains cas (Trettin et al., 1991; Prevost et al., 1997; Poulin et al., 1999; Paal et al., 2016). Ainsi, si le drainage a eu ici un effet quelconque, seuls les sites F1 et C1 auraient pu être affectés, mais les canaux sont très récents (années 1990), tandis que les quatre autres sites se trouvent à des distances trop éloignées des canaux les plus proches pour qu'ils



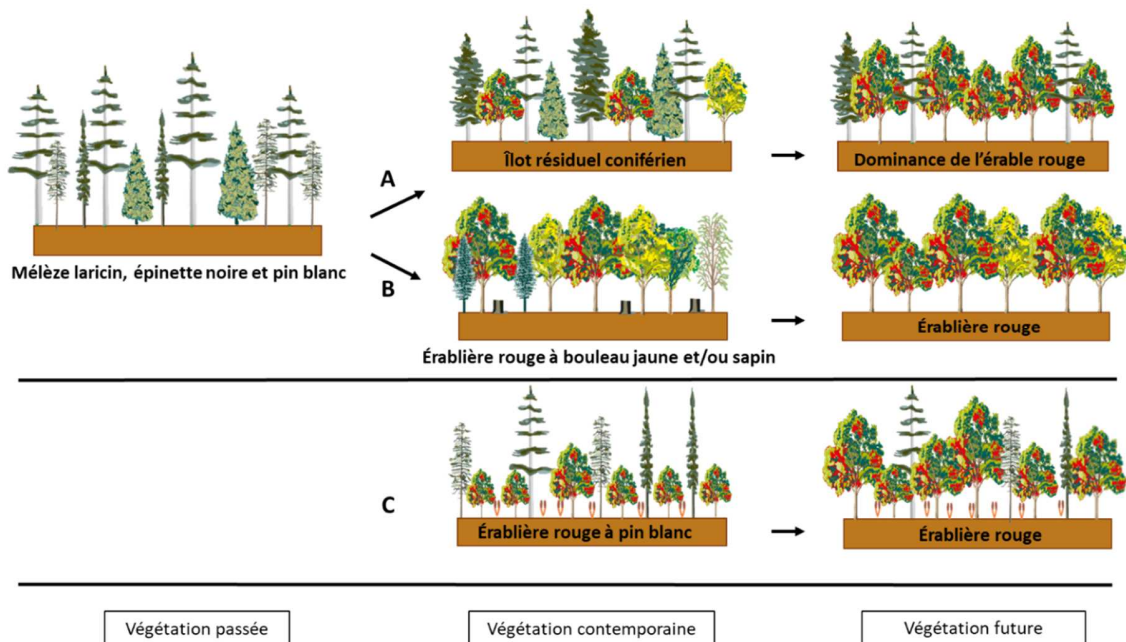
aient été affectés d'une quelconque façon. Les canaux n'ont donc pas eu d'incidence sur l'origine et la dynamique subséquente des peuplements forestiers étudiés.

Dans le sud-ouest du Québec, l'importante prolifération du bouleau gris sur les tourbières ombrotrophes au cours de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle est souvent survenue après un feu d'origine humaine (Jean et Bouchard, 1987 ; Beaugard et al., sous presse). Par contre, aucun horizon de charbons n'a été trouvé au sein de la tourbe des six peuplements de la tourbière de Saint-Georges-de-Clarenceville, de sorte que le feu n'aurait eu que peu ou pas d'influence sur la dynamique des peuplements forestiers. Au sein du domaine bioclimatique de l'érablière à caryer cordiforme du sud-ouest du Québec, les feux d'origine naturelle sont très rares et peu sévères, à l'exception de ceux pouvant survenir au sein de quelques communautés végétales spécifiques sur sols xériques (Meilleur et al., 1994; 1997; Brisson, 2009).

## 1.6 Conclusion

Considérant que des analyses paléoécologiques n'ont été menées que pour deux des six sites étudiés (F1 et C1), il est difficile de conclure à un schéma de la dynamique successionnelle à long terme (plusieurs siècles) pour tous les peuplements (Figure 8). La présence d'une forêt coniférienne passée (*Larix laricina*, *Picea mariana*, *Thuja occidentalis*, *Pinus strobus*), démontrée par l'identification botanique des bois enfouis dans la tourbe et l'identification des souches, a précédé la composition actuelle de trois peuplements (F1, F2 et C1). Une telle forêt a fort probablement aussi été présente auparavant sur les autres sites à l'étude (F3, C2 et C3), étant donné que les études paléoécologiques ont montré que le mélèze laricin et l'épinette noire sont les espèces arborescentes les plus abondantes lors du développement des tourbières des régions tempérées de l'est du Canada et des États-Unis (Hu et Davis, 1995 ; Robichaud et Bégin, 2009 ; Lavoie et al., 2012 ; Pilote et al., 2018). La dynamique contemporaine des peuplements (XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles) aurait évolué de manière différente selon l'intensité des pressions anthropiques, plus particulièrement les activités de coupe réalisées au fil du temps par les différents propriétaires des lots de la tourbière. Ainsi, certains îlots conifériens résiduels se seraient maintenus (sites C1 et C2 ; Figure 8, trajectoire A), tandis que d'autres auraient évolué vers une érablière rouge suite à l'exploitation du pin blanc (sites F1 et F2 ; trajectoire B). Pour sa part, la partie centrale de la tourbière est caractérisée par un envahissement récent des érables rouges (trajectoire C). En raison des activités anthropiques *in situ*, l'ensemble des peuplements ont été caractérisés par une importante colonisation de l'érable rouge. Cette espèce présente d'ailleurs une

importante régénération au sein des six sites étudiés. Considérant que les activités anthropiques *in situ* et *ex situ* se poursuivront au cours des prochaines décennies et que les changements climatiques pourraient favoriser la densification du couvert forestier sur les tourbières (Heijmans et al., 2013), il est raisonnable de penser que les peuplements seront de plus en plus dominés par l'érable rouge. Les différentes espèces présentes actuellement vont continuer de subsister dans le paysage si les activités de coupe ne sont pas trop intenses, mais elles seront graduellement accompagnées par l'érable rouge. Ainsi, l'évolution devrait laisser place à différents types d'érablières rouges, accompagnées selon le cas et à des densités variables par les différentes espèces présentes actuellement.



**Figure 8 :** Proposition d'un schéma de la dynamique successionale des peuplements forestiers des sites à l'étude. La végétation passée était caractérisée par un peuplement à dominance coniférienne composé de *Larix laricina*, *Picea mariana*, *Thuja occidentalis* et *Pinus strobus*. Celui-ci s'est transformé, au courant du XIX<sup>e</sup> siècle, vers différents peuplements mixtes selon l'intensité des coupes locales. A : Certains îlots conifériens résiduels (sites C1 et C2) se seraient maintenus dans le temps tout en voyant l'installation d'espèces feuillues comme l'érable rouge ; B : D'autres peuplements (sites F1 et F2) auraient évolué vers une érablière rouge suite à l'exploitation du pin blanc (représenté par les souches) ; C : La partie centrale de la tourbière (site F3) a été caractérisée par un envahissement récent des érables rouges. L'ensemble des peuplements forestiers actuels devraient être de plus en plus dominés par l'érable rouge dans le futur, cette espèce étant la plus abondante au sein de la strate de régénération de chacun des peuplements.

## Conclusion générale

Encore peu d'études ont permis de documenter l'origine et la dynamique des peuplements forestiers qui s'opèrent sur les tourbières du sud du Québec. Dans ce contexte, les résultats obtenus dans le présent mémoire fournissent de nouvelles connaissances concernant l'époque et l'origine de la formation de peuplements forestiers mixtes. En outre, l'identification botanique de bois de taille macroscopique s'avère originale dans l'étude paléoécologique des tourbières et livre de précieuses informations sur la présence passée locale des espèces arborescentes, sans être aussi fastidieuse que les analyses macrofossiles traditionnelles. Les résultats obtenus suite aux analyses des bois enfouis et des souches suggèrent que la tourbière héberge des peuplements composés de mélèze laricin, d'épinette noire, de thuya occidental et de pin blanc depuis très longtemps, c'est-à-dire depuis quelques milliers d'années. Ainsi, le pin blanc serait présent localement sur la tourbière de manière continue depuis au moins 3000 ans. À notre connaissance, c'est la première fois qu'une étude démontre la présence naturelle de cette espèce sur une tourbière depuis si longtemps en Amérique du Nord. Les analyses dendrochronologiques ont permis de dater la formation des peuplements mixtes sur tourbe à partir des années 1840. À cette époque, puisque la tourbière était fractionnée en plusieurs lots de propriétés privées, les peuplements ont été l'objet de perturbations anthropiques d'intensité variable. Les peuplements conifériens d'origine (mélèze laricin, épinette noire, thuya occidental et pin blanc) ont donc connu un changement dans leur dynamique suite aux nombreuses coupes du XIX<sup>e</sup> et du XX<sup>e</sup> siècle. Les peuplements mixtes relativement denses que l'on retrouve actuellement sur la tourbière, comportant entre autres l'érable rouge, le bouleau jaune et le frêne noir, résultent donc d'une dynamique régie par des perturbations anthropiques *in situ*, essentiellement de la coupe forestière artisanale à petite échelle. D'autres peuplements, comme les îlots résiduels de conifères, ont persisté dans le temps probablement dû à une plus faible intensité des coupes.

Depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, la dynamique successionnelle qui s'opère au sein de l'ensemble des peuplements étudiés est relativement semblable. En raison des activités anthropiques *in situ*, les peuplements ont été caractérisés par une importante colonisation de l'érable rouge. Considérant que la tourbière est divisée en plusieurs propriétés privées, il est fort probable que certains secteurs de la tourbière vont continuer à être exposés à la coupe. Des canaux de drainage furent aussi créés récemment, ce qui peut mener à un assèchement de la tourbe dans les secteurs avoisinant les canaux. Compte tenu du fait que l'érable rouge est l'espèce dominante au sein de la régénération des

peuplements étudiés, il est raisonnable de penser que la tourbière de Saint-Georges-de-Clarenceville sera éventuellement dominée par des érablières rouges.

Dans la présente étude, seulement six sites ont été étudiés. Bien qu'ils soient représentatifs des divers types de peuplements de la tourbière, il est clair qu'il serait utile d'étendre le réseau d'échantillonnage à d'autres peuplements compte tenu de la vaste superficie de la tourbière. De plus, il a été impossible d'effectuer des analyses de bois pour l'ensemble des sites étudiés, car des autorisations en ce sens ne furent données que par un propriétaire. Il serait donc intéressant de bonifier les présents résultats par des analyses complémentaires pouvant notamment donner d'autres informations sur les peuplements d'origine. En ce sens, des analyses macrofossiles détaillées de carottes sédimentaires permettraient d'avoir une vision plus globale et complète de la composition du cortège floristique passé présent sur la tourbière. En outre, une analyse des thécamoebiens serait susceptible de fournir de précieuses indications paléohydrologiques concernant les changements passés de la position de la nappe phréatique. En effet, il serait alors peut-être possible de voir si l'installation du pin blanc résulterait d'un bas niveau de la nappe, et donc d'un climat plus sec à une certaine époque. Dans le secteur des sites F1 et C1 où les excavations furent réalisées, des sondages à la tige indiquent la présence, sur une vaste superficie, d'un épais horizon de bois vers 1-1.50 m de profondeur. C'est à cette profondeur que les plus anciens bois de pin blanc datés furent trouvés, de même que le tronc de la même espèce récolté par le propriétaire du site. Ceci laisse croire à une phase densément boisée de la tourbière à cette époque et à une présence importante du pin blanc. De telles analyses paléoécologiques (thécamoebiens, macrofossiles) permettraient d'éclaircir les causes de la formation de peuplements aussi denses il y a quelques millénaires, peuplements encore inusités selon moi chez les tourbières du nord-est de l'Amérique du Nord. Les connaissances sur les feux qui ont sévi dans la tourbière pourraient également être bonifiées.

Enfin, une telle étude devrait être reproduite dans d'autres tourbières forestières des basses-terres du Saint-Laurent. La dynamique identifiée pour la tourbière de Saint-Georges-de-Clarenceville (coupe du pin blanc, de l'épinette et du mélèze) et l'installation subséquente de l'érable rouge n'est peut-être pas la même pour les régions plus à l'est du territoire. En effet, vers l'est, les placettes des inventaires forestiers du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec montrent, à priori, une diminution de l'importance de peuplements forestiers mixtes sur tourbe, notamment de l'érable rouge. Certaines tourbières dans l'est des basses-terres n'en demeurent pas moins densément boisées. Des

travaux similaires aux miens permettraient aussi de connaître la ou les causes à l'origine de ces peuplements et d'émettre des hypothèses sur leur trajectoire éventuelle.

## Références

- Abrams, M.D., Copenheaver, C.A., Black, B.A. & Gevel, S.V.D. (2001). Dendroecology and climatic impacts for a relict, old-growth, bog forest in the Ridge and Valley Province of central Pennsylvania, U.S.A. *Canadian Journal of Botany*, 79, 58-69.
- Asselin, H. & Payette, S. (2005). Late Holocene deforestation of a tree line site: estimation of pre-fire vegetation composition and black spruce cover using soil charcoal. *Ecography*, 28, 801-805.
- Avard, K., Larocque, M. & Pellerin, S. (2013). Perturbations des tourbières de la région de Bécancour, Centre-du-Québec, entre 1966 et 2010. *Le Naturaliste canadien*, 137, 8-15.
- Beauregard, P., Lavoie, M. & Pellerin, S. Recent gray birch (*Betula populifolia*) encroachment in temperate peatlands of eastern North America. *Wetlands*, sous presse.
- Belvisi, J. & Beaulieu, J. (2008). Cartographie de base des milieux humides de la Montérégie. GéoMont et Canards Illimités Canada. Rapport de synthèse, 28 pages.
- Berendse, F., Van Breemen, N., Rydin, H., Buttler, A., Heijmans, M., Hoosbeek, M.R., Lee, J.A., Mitchell, E., Saarinen, T., Vasander, H. & Wallen, B. (2001). Raised atmospheric CO<sub>2</sub> levels and increased N deposition cause shifts in plant species composition and production in *Sphagnum* bogs. *Global Change Biology*, 7, 591-598.
- Berg, E.E., McDonnell Hillman, K., Dial, R. & DeRuwe, A. (2009). Recent woody invasion of wetlands on the Kenai peninsula lowlands, south-central Alaska: a major regime shift after 18 000 years of wet *Sphagnum*-sedge peat recruitment. *Canadian Journal of Forest Research*, 39, 2033-2046.
- Birks, H.H. (1975). Studies in the Vegetational history of Scotland. IV. Pine stumps in scottish blanket peats. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 270, 181-226.
- Blanchard, F., Pellerin, S. & Poulin, M. (2018). La tourbière de la base de plein air de Sainte-Foy : quatre décennies de changements floristiques. *Naturaliste canadien*, 142, 22-30.
- Bouchard, A. & Domon, G. (1997). The transformations of the natural landscapes of the Haut-Saint-Laurent (Québec) and their implications on future resource management. *Landscape and Urban Planning*, 37, 99-107.
- Bouchard, A., Dyrda, S., Bergeron, Y. & Meilleur, A. (1989). The use of notary deeds to estimate the changes in the composition of 19th century forests, in Haut-Saint-Laurent, Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 19, 1146-1150.
- Bouchard, A. & Jean, M. (2001). Historique d'un paysage de tourbières profondément transformé par l'homme. Dans Payette, S. & Rochefort, L. (éditeurs). *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Presses de l'Université Laval, Québec, pp. 389-398.

- Brisson, J. (2009). Domaine de l'érablière à caryer cordiforme. Dans *Ordre des ingénieurs forestiers* (éditeur). *Manuel de Foresterie*, 2e édition. Éditions MultiMondes, Québec, pp. 206-215.
- Brisson, J. & Bouchard, A. (2003). Human activities caused major changes in tree species composition in southern Quebec, Canada. *Ecoscience*, 10, 236–246.
- Bunting, M.J., Morgan, C.R., Van Bakel, M. & Warner, B.G. (1998). Pre-European settlement conditions and human disturbance of a coniferous swamp in southern Ontario. *Canadian Journal of Botany*, 76, 1770-1779.
- Connolly, J. & Holden, N.M. (2013). Classification of peatland disturbance. *Land Degradation and Development*, 24, 548–555.
- Cook, E.R. (1985). A time series analysis approach to tree-ring standardization. Ph.D. thesis, University of Arizona, Tucson, Arizona.
- Cook, E.R., Briffa, K.R., Shiyatov S. & Mazepa V. (1990). Tree-Ring standardization and growth-trend estimation. Pages 104-122 in E.R. Cook & L.A. Kairiuktis (éditeurs). *Methods of Dendrochronology, Applications in Environmental Sciences*. Kluwer Academic Press, Boston, Massachusetts.
- Couillard, L. & Grondin, P. (1986). La végétation des milieux humides du Québec. Les publications du Québec. Gouvernement du Québec, 400 pages.
- Cubizolle, H., Thebaud, G., Seytre, L., Porteret, J. & Tourman, A. (2009). Les causes du développement de l'arbre sur les tourbières du Massif Central oriental (France) au cours du XX<sup>ème</sup> siècle. Dans Cubizolle, H., Hölzler, A., Duchamp, L. & Müller, F. (éditeurs). *Écologie et protection des tourbières - Ökologie und Schutz der Moore*. Annales scientifiques de la Réserve de Biosphère transfrontalière, Vosges du Nord-Pfälzerwald, pp. 140-170.
- Eckstein, J., Leuschner, H. & Bauerochse, A. (2011). Mid-Holocene pine woodland phases and mire development - significance of dendroecological data from subfossil trees from northwest Germany. *Journal of Vegetation Science*, 22, 781-794.
- Edvardsson, J., Linderson, H., Rundgren, M. & Hammarlund, D. (2012). Holocene peatland development and hydrological variability inferred from bog-pine dendrochronology and peat stratigraphy – a case study from southern Sweden. *Journal of Quaternary Science*, 27, 553-563.
- Edvardsson, J., Poska, A., Van der Putten, N., Rundgren, M., Linderson, H., & Hammarlund, D. (2014). Late-Holocene expansion of a south Swedish peatland and its impact on marginal ecosystems: Evidence from dendrochronology, peat stratigraphy and palaeobotanical data. *The Holocene*, 24, 466-476.
- Edvardsson, J., Stoffel, M., Corona, C., Bragazza, L., Leuschner, H.H., Charman, D.J. & Helama, S. (2016). Subfossil peatland trees as proxies for Holocene palaeohydrology and palaeoclimate. *Earth-Science Reviews*, 163, 118-140.

- Environnement Canada (2016). Normales climatiques canadiennes. Site consulté le 26 juin 2019.  
[www.climat.meteo.gc.ca/climate\\_normals/index\\_f.html](http://www.climat.meteo.gc.ca/climate_normals/index_f.html)
- Forrester, J.A., Yorks, T.E. & Leopold, D.J. (2005). Arboreal vegetation, coarse woody debris, and disturbance history of mature and old-growth stands in a coniferous forested wetland. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 132, 252-261.
- Fortney, R.H., Stephenson, S.L., Rentch, J.S. (2015). Rare plant communities in Canaan Valley, West Virginia. *Southeastern Naturalist*, 14, 121-135.
- Frankl, R. & Schmeidel, H. (2000) Vegetation change in a South German raised bog: Ecosystem engineering by plant species, vegetation switch or ecosystem level feedback mechanism? *Flora*, 195, 267-276.
- Freléchoux, F., Buttler, A., Schweingruber, F. & Gobat, J. (2000). Stand structure, invasion, and growth dynamics of bog pine (*Pinus uncinata* var. *rotundata*) in relation to peat cutting and drainage in the Jura Mountains, Switzerland. *Canadian Journal of Forest Research*, 30, 1114-1126.
- Frolking, S., Talbot, J., Jones, M.C., Treat, C.C., Kauffman, J.B., Tuittila, E. & Roulet, N. (2011). Peatlands in the Earth's 21st century climate system. *Environmental Reviews*, 19, 371-396.
- Glaser, P.H. & Janssens, J.A. (1986). Raised bogs in eastern North America: transitions in landforms and gross stratigraphy. *Canadian Journal of Botany*, 64, 395-415.
- Golet, F.C., Calhoun, A.J.K., DeRagon, W.R., Lowry, D.J. & Gold, A..J. (1993) Ecology of red maple swamps in the glaciated northeast: A community profile. U.S. Fish and Wildlife Service, Technical Report Series, Biological Report 12.
- Grissino-Mayer, H.D. (2001). Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57, 2005-221.
- Gunnarson, U., Malmer, N. & Rydin, H. (2002). Dynamics or constancy on *Sphagnum* dominated mire ecosystems: a 40 years study. *Ecography*, 25, 685-704.
- Heijmans, M.P.D., van der Knaap, Y.A.M., Holmgren, M. & Limpens, J. (2013). Persistent versus transient tree encroachment of temperate peat bogs: effects of climate warming and drought events. *Global Change Biology*, 19, 2240-2250.
- Holmes, R.L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree Ring Bulletin*, 44, 69-75.
- Hu, F.S. & Davis, R.B. (1995). Postglacial development of a Maine bog and paleoenvironmental implications. *Canadian Journal of Botany*, 73, 638-649.
- Ireland, A.W. & Booth, R.K. (2012). Upland deforestation triggered an ecosystem state-shift in a kettle peatland. *Journal of Ecology*, 100, 586-596.



- Jacquot, C. (1955) Atlas d'anatomie des bois des Conifères, Paris, Centre technique du bois, 133 p.
- Jean, M. & Bouchard, A. (1987). La végétation de deux tourbières de la municipalité régionale de comté du Haut-Saint-Laurent (Québec). *Canadian Journal of Botany*, 65, 1969-1988.
- Jowsey, P.C. (1966). An improved peat sampler. *New Phytologist*, 65, 245-248.
- Krapiec, M. & Szychowska-Krapiec, E. (2016). Subfossil bog-pine chronologies from The Puścizna Wielka raised bog, Orawa Basin, southern Poland. *Quaternary International*, 415, 145-153.
- Laine, J., Vasander, H. & Laiho, R. (1995). Long-term effects of water level drawdown on the vegetation of drained pine mires in southern Finland. *Journal of Applied Ecology*, 32, 785-802.
- Larouche, A. (1979). Histoire postglaciaire comparée de la végétation à Sainte-Foy et au mont des Éboulements, Québec, par l'analyse macrofossile et l'analyse pollinique. Mémoire de M.Sc., Université Laval, Québec.
- Lavoie, M., Larouche, A.C. & Richard, P.J.H. (1995). Conditions du développement de la tourbière de Farnham, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 49, 305-316.
- Lavoie, M. & Pellerin, S. (2015). The palaeoecological record of gray birch (*Betula populifolia*) in eastern North America. *Botany*, 93, 801-808.
- Lavoie, M., Pellerin, S. & Larocque, M. (2013). Examining the role of allogenuous and autogenous factors in the long-term dynamics of a temperate headwater peatland (southern Québec, Canada). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386, 336-348.
- Lavoie, M., Robert, É.C. & Colpron-Tremblay, J. (2012). Développement d'une vaste tourbière ombrotrophe non perturbée en contexte périurbain au Québec méridional. *Écoscience*, 19, 285-297.
- Lavoie, S.-K. (2017). Dynamique du pin blanc (*Pinus strobus* Linnaeus) dans les tourbières ombrotrophes du sud du Québec. Mémoire de M.Sc., Université Laval, Québec.
- Leuschner, H., Sass-Klaassen, U., Jansma, E., Baillie, M., & Spurk, M. (2002). Subfossil European bog oaks: population dynamics and long-term growth depressions as indicators of changes in the Holocene hydro-regime and climate. *The Holocene*, 12, 695-706.
- Limpens, J., Holmgren, M., Jacobs, C.M.J., Karofeld, E. & Berendse, F. (2014). How does tree density affect water loss of peatlands? A mesocosm experiment. *PLoS ONE*, 9, e91748.
- Linderholm, H.W. & Leine, M. (2004). An assessment of twentieth century tree-cover changes on a southern Swedish peatland combining dendrochronology and aerial photograph analysis. *Wetlands*, 24, 357-363.

- Lussier, C. (2004). Profils historiques du bassin de la baie Missisquoi. Portrait du bassin versant de la baie Missisquoi. Corporation Bassin Versant Baie Missisquoi. 100 p.
- Lyon, C.J. (1949). Secondary growth of white pine in bog and upland. *Ecology*, 30, 549-552.
- Marchand, N., Filion, L. (2014). A dendroecological analysis of eastern hemlock and white pine in relation to logging in La Mauricie National Park (Quebec, Canada). *Forestry Chronicle*, 90, 351-360.
- Meilleur, A., Bouchard, A. & Bergeron, Y. (1994). The relation between geomorphology and forest community of the Haut-Saint-Laurent, Quebec. *Vegetatio*, 111, 173-192.
- Meilleur, A., Brisson, J. & Bouchard, A. (1997). Ecological analysis of the northernmost population of pitch pine (*Pinus rigida*). *Canadian Journal of Forest Research*, 27, 1342-1350.
- Méthot, S., Blais, L., Gravel, J., Latrémouille, I., St-Pierre, S. & Vézeau, S. (2014). Guide d'inventaire et d'échantillonnage en milieu forestier. Québec, gouvernement du Québec, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, 237 p.
- Minkkinen, K., Vasander, H., Jauhiainen, S., Karsisto, M. & Laine, J. (1999). Post-drainage changes in vegetation composition and carbon balance in Lakkasuo mire, central Finland. *Plant and Soil*, 207, 107–120.
- Moizuk, G.A. & Livingston, R.B. (1966). Ecology of red maple (*Acer rubrum* L.) in a Massachusetts upland bog. *Ecology*, 47, 942-950.
- Muller, S.D., Richard, P.J.H. & Larouche, A.C. (2003). Holocene development of a peatland (southern Québec): a spatio-temporal reconstruction based on pachymetry, sedimentology, microfossils and macrofossils. *The Holocene*, 13, 649-664.
- O'connell, J., Connolly, J. & Holden, N.M. (2014). A monitoring protocol for vegetation change on Irish peatland and heath. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 31, 130–142.
- Ohlson, M. & 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.
- Ott, C. & Chimner, R. (2016). Long-term peat accumulation in temperate forested peatlands (*Thuja occidentalis* swamps) in the Great Lakes region of North America. *Mires and Peat*, 18, Article 01.
- Paal, J., Jurjendal, I., Suija, A. & Kull, A. (2016). Impact of drainage on vegetation of transitional mires in Estonia. *Mires and Peat*, 18, Article 02.
- Pasquet, S., Pellerin, S. & Poulin, M. (2015). Three decades of vegetation changes in peatlands isolated in an agricultural landscape. *Applied Vegetation Science*, 18, 220-229.

- Payette, S. & Rochefort, L. (2001). *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Les Presses de l'Université Laval, Québec.
- Pellerin, S. & Lavoie, C. (2003a). Reconstructing the recent dynamics of mires using a multitechnique approach. *Journal of Ecology*, 91, 1008-1021.
- Pellerin, S. & Lavoie, C. (2003b). Recent expansion of jack pine in peatlands of southeastern Québec: A paleoecological study. *Écoscience*, 10, 247-257.
- Pellerin, S., Lavoie, M., Boucheny, A., Larocque, M. & Garneau, M. (2016a). Recent vegetation dynamics and hydrological changes in bogs located in an agricultural landscape. *Wetlands*, 36, 159-168.
- Pellerin, S., Lavoie, M., Talbot, J. & Pelletier, N. (2016b) *Dynamique éco-hydrologique de la tourbière du Parc national du Mont Saint-Bruno*. Rapport présenté à la Société des établissements de plein air du Québec, Parc national du Mont Saint-Bruno, 31 p.
- Pellerin, S. & Poulin, M. (2013). *Analyse de la situation des milieux humides au Québec et recommandations à des fins de conservation et de gestion durable*. Rapport présenté au Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec, 104 p.
- Pilote, L.M., Garneau, M., van Bellen, S. & Lamothe, M. (2018). Multiproxy analysis of inception and development of the Lac-à-la-Tortue peatland complex, St Lawrence Lowlands, eastern Canada. *Boreas*, 47, 1084-1101.
- Poulin, M., Pellerin, S., Cimon-Morin, J., Lavallée, S., Courchesne, G. & Tendland, Y. (2016). Inefficacy of wetland legislation for conserving Quebec wetlands as revealed by mapping of recent disturbances. *Wetlands Ecology and Management*, 24, 651-665.
- Poulin, M., Rochefort, L. & Desrochers, A. (1999). Conservation of bog plant species assemblages: Assessing the role of natural remnants in mined sites. *Applied Vegetation Science*, 2, 169-180.
- Prevost, M., Belleau, P. & Plamondon, A.P. (1997). Substrate conditions in a treed peatland: Responses to drainage. *Écoscience*, 4, 543-554.
- Ratcliffe, J.L., Creevy, A., Andersen, R., Zarov, E., Gaffney, P.J., Taggart, M.A., Mazei, Y., Tsyganov, A.N., Rowson, J.G., Lapshina, E.D. & Payne, R.J. (2017) Ecological and environmental transition across the forested-to-open bog ecotone in a west Siberian peatland. *Science of the Total Environment*, 607-608, 816-828.
- 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. & Weyhenmeyer, C.E. (2009). IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 51, 1111-1150.

- Rion, V., Gallandat, J.D., Gobat, J.M. & Vittoz, P. (2018). Recent changes in the plant composition of wetlands in the Jura Mountains. *Applied Vegetation Science*, 21, 121-131.
- Robichaud, A. & Bégin, Y. (2009) Development of a raised bog over 9000 years in Atlantic Canada. *Mires and Peat*, 4, 1-19.
- Sarkkola, S., Hokka, H., Koivusalo, H., Nieminen, M., Ahti, E., Paivanen, J. & Laine, J. (2010). Role of tree stand evapotranspiration in maintaining satisfactory drainage conditions in drained peatlands. *Canadian Journal of Forest Research*, 40, 1485-1496.
- Schweingruber, F. H. (1990). Anatomie Europäischer Holzer - Anatomy of European Woods, Paul Haupt Berne and Stuttgart Publishers, Zurich.
- Simard, H. & Bouchard, A. (1996). The precolonial 19th century forest of the Upper St Lawrence region of Quebec: A record of its exploitation and transformation through notary deeds of wood sales. *Canadian Journal of Forest Research*, 26, 1670-1676.
- Swineheart, A.L. & Parker, G.R. (2000). Palaeoecology and development of peatlands in Indiana. *American Midland Naturalist*, 143, 267-297.
- Talbot, J., Richard, P.J.H., Roulet, N.T. & Booth, R.K. (2010). Assessing long-term hydrological and ecological responses to drainage in a raised bog using paleoecology and a hydrosequence. *Journal of Vegetation Science*, 21, 143-156.
- Têtu, C.E. (1829). Seigneurie de Foucault ou Caldwell Manor [Document cartographique]. Bibliothèque et Archives nationales du Québec. <http://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/3143195?docsearchtext=seigneurie%20de%20foucault> (consulté le 17 septembre 2018).
- Trettin, C.C., Johnson, J.R. & Mislak, R.D. (1991). Hydrologic effects of a prescription drainage system on a forested wetland in northern Michigan. Dans Jeglum, J.K. & Overend, R.P. (éditeurs), Symposium '89, Peat and peatlands, Diversification and innovation: Proceedings, 6 - 10 August 1989, Québec City, Canada. Canadian Society for Peat and Peatlands: 175-183.
- van der Linden, M., Vickery, E., Charman, D.J., Broekens, P. & van Geel, B. (2008). Vegetation history and human impact during the last 300 years recorded in a German peat deposit. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 152, 158-175.
- Vaughan, A.H. (1840). Plan of the seigniorie Foucault or Allard's Manor [Document cartographique]. Bibliothèque et Archives nationales du Québec. <http://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/3143194?docsearchtext=seigneurie%20de%20foucault> (consulté le 17 septembre 2018).
- Warren II, R.J., Rossell, I.M. & Moorhead, K.K. (2004) Colonization and establishment of red maple (*Acer rubrum*) in a southern Appalachian wetland. *Wetlands*, 24, 364-374.

## Annexes



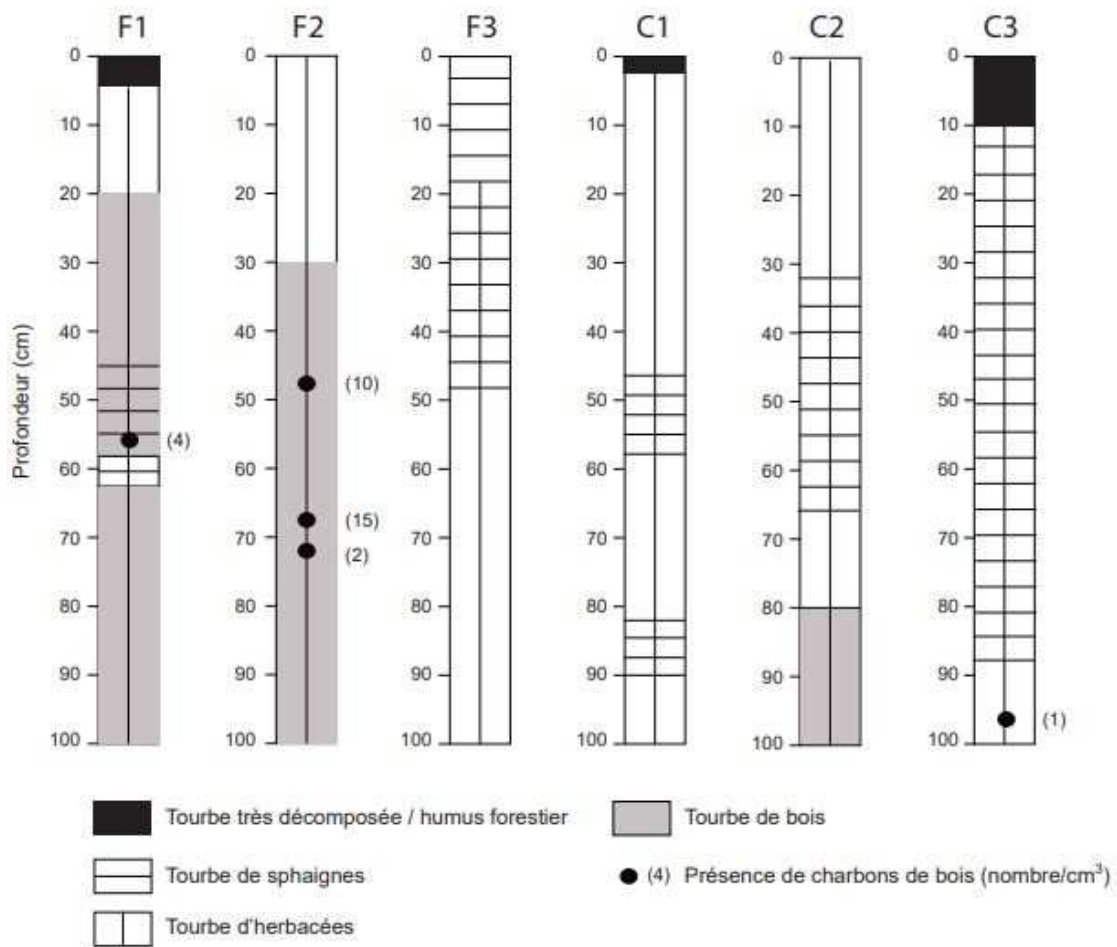
**Annexe 1:** Tronc de pin blanc au sol près du site F2 bien conservé pour permettre une analyse dendrochronologique. L'individu aurait pris naissance en 1557 et serait mort peu après 1837.



**Annexe 2:** Tronc de pin blanc enfoui à environ 1.50 m de profondeur à 300 m au nord du site F2. Il fut extrait antérieurement par le propriétaire du terrain lors du creusement d'un canal de drainage. Le pin blanc est daté à 3120 ans A.A.

**Annexe 3:** Relevé de végétation (excluant les arbres) des sites à l'étude. Les chiffres représentent le pourcentage de recouvrement des espèces par rapport à la superficie totale de la placette (400 m<sup>2</sup>). Le symbole « + » indique une présence inférieure à 1 %.

Espèces	Sites					
	F1	F2	C1	C2	C3	F3
<i>Aralia nudicaulis</i>	+	+		+	+	
<i>Triphyllum</i> subsp. <i>triphyllum</i>		+				
<i>Oclemena acuminata</i>	+		+			
<i>Athyrium filix-femina</i>	+					
<i>Carex</i> sp.	+	+				
<i>Clintonia borealis</i>		+	+	+	+	
<i>Coptis trifolia</i>		+	+	1	5	10
<i>Cornus canadensis</i>				+		
<i>Cypripedium acaule</i>			+		+	
<i>Dryopteris spinulosa</i>	5	+	5	2		
<i>Fragaria</i> sp.				+		
<i>Galium triflorum</i>	+					
Poaceae	+					
<i>Ilex verticillata</i>			+	+		
<i>Impatiens capensis</i>	70	+	+			
<i>Maianthemum canadense</i>		+		+		
<i>Matteucia struthiopteris</i>	5	+	+	2		
<i>Medeola virginiana</i>			+			
<i>Mentha</i> sp.	+					
<i>Mitchella repens</i>		+	+	+		
<i>Onoclea sensibilis</i>		5				
<i>Osmunda regalis</i>		+				
<i>Osmundastrum cinnamomeum</i>					+	+
<i>Oxalis montana</i>			+			
<i>Parthenocissus quinquefolia</i>			+			
<i>Pyrola</i> sp.		+				
<i>Rhododendron groenlandicum</i>						+
<i>Rubus allegheniensis</i>	+					
<i>Rubus pubescens</i>	+	5	+	+		
<i>Rubus idaeus</i>	5		+			
<i>Scutellaria lateriflora</i>		+				
<i>Sphagnum</i> sp.					30	60
<i>Tiarella cordifolia</i>	+	+				
<i>Lysimachia borealis</i>		+		+		
<i>Trillium erectum</i>		+	+			
<i>Trillium undulatum</i>			+			
<i>Vaccinium corymbosum</i>						20
<i>Viola blanda</i>	3	+	+	+		



**Annexe 4:** Stratigraphie et contenu en charbons de bois de taille macroscopique du mètre supérieur de la tourbe récolté au sein de chacun des sites à l'étude.