

EMMANUELLE FAY

**LA DYNAMIQUE ET L'IMPACT DU BOULEAU ENVAHISSEUR
DANS UNE TOURBIÈRE DE L'EST DU CANADA**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en aménagement du territoire
et développement régional
pour l'obtention du grade de Maître en aménagement du territoire
et développement régional (M.ATDR)

ÉCOLE SUPÉRIEURE D'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE
ET DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL
FACULTÉ D'AMÉNAGEMENT, D'ARCHITECTURE ET DES ARTS VISUELS
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

MAI 2006

© Emmanuelle Fay, 2006

Résumé

Les invasions d'arbres ont un impact appréciable sur la ressource eau, et ce, particulièrement dans les milieux humides. Plusieurs de ces milieux sont affectés par différentes activités anthropiques, ce qui les rend encore plus vulnérables aux impacts des invasions biologiques. C'est notamment le cas d'une bonne partie des tourbières exploitées et abandonnées de l'Est du Canada qui sont envahies par le bouleau. L'objectif de cette étude est de déterminer quels sont les facteurs qui favorisent l'envahissement d'un site par le bouleau et l'impact de cet envahissement sur le taux d'évapotranspiration d'une tourbière (pertes en eau). Pour ce faire, 80 quadrats ont été inventoriés (caractéristiques hydrologiques, pédologiques et dendrométriques) au sein de sections abandonnées de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis (Québec) afin de mieux comprendre la dynamique de l'envahissement par le bouleau. Un dispositif expérimental a aussi été mis en place pour mesurer le taux moyen de transpiration du bouleau. L'envahissement par le bouleau est particulièrement important dans les sites tourbeux les plus secs. Il ne s'agirait toutefois que d'un phénomène temporaire ne durant que quelques décennies. Par contre, l'envahissement d'un site par le bouleau, même s'il n'est que de courte durée, peut avoir un impact sur les pertes d'eau par transpiration d'une tourbière. En effet, dans un site fortement envahi par le bouleau, les pertes d'eau par transpiration pour la saison estivale peuvent atteindre plus de 5 700 000 litres par hectare (570 mm/année), soit une valeur deux fois plus élevée que la quantité d'eau qui aurait été perdue par évaporation si le site n'avait pas été envahi. Une invasion de bouleau pourrait empêcher ou retarder le retour des espèces typiques des tourbières et ainsi nuire à la régénération naturelle ou la restauration de cet écosystème. Cependant, comme le bouleau ne s'établit pas dans les sites très humides, le simple blocage des canaux de drainage pourrait être une mesure suffisante pour empêcher l'envahissement.

À Marc-André, qui ne se lasse jamais
de m'encourager.

Remerciements

Je remercie premièrement mon directeur, M. Claude Lavoie, pour son soutien, son encadrement ainsi que pour tout ce qu'il m'a appris au cours de cette maîtrise. Je remercie également Mme Line Rochefort et M. Pierre Bernier pour leurs judicieux conseils lors de l'élaboration des protocoles de recherche et pour les corrections apportées à ce mémoire.

Je remercie mes assistantes, soit Mmes Patricia Gagnon, Marie-Claire LeBlanc, Catherine Plasse et Hélène Poulin-Côté, pour avoir rendu chaque journée de terrain si agréable. Un merci spécial à Mme Annie Saint-Louis pour toute son expérience et son aide exceptionnelle lors de la cueillette des données. Je tiens aussi à souligner mon appréciation à tout le personnel de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, et plus particulièrement à M. Georges Gagnon de la compagnie *Premier Horticulture Inc.*, pour leur aide sur le terrain.

Je remercie M. Paul Villeneuve pour ses judicieux conseils en statistiques. Merci aussi à M. Éric Dugal pour avoir pris soin tout au long de l'été 2005 des petits bouleaux en pots utilisés pour cette étude. Je voudrais également remercier les membres du Groupe de recherche en écologie des tourbières et tous mes collègues de l'École supérieure d'aménagement du territoire et de développement régional pour avoir créé un environnement de travail si stimulant. Je remercie particulièrement ma collègue de bureau, Mme Ève-Marie Morissette, pour son aide et son soutien au cours de ces deux dernières années.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à ma famille, ma belle-famille et mes amis qui s'intéressent toujours à ce que je fais. Je remercie spécialement mes parents qui ont toujours cru en moi et qui me supportent depuis 25 ans, et ce, autant financièrement que moralement. Il y a aussi ma petite sœur qui mérite un merci particulier puisqu'elle m'aide et m'encourage si souvent. Puis, il y a aussi mon chum, Marc-André, sans qui rien ne serait aussi facile.

Cette étude n'aurait pu voir le jour sans le soutien financier de la Chaire de recherche en aménagement des tourbières (elle-même supportée par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada et par l'industrie canadienne de la tourbe), de l'École supérieure d'aménagement du territoire et de développement régional et de l'Université Laval.

Table des matières

Résumé	i
Remerciements	iii
Table des matières	iv
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vi
1.0 Introduction	1
2.0 Méthodes	6
2.1 Facteurs favorisant l’envahissement par le bouleau	6
2.1.1 Site d’étude	6
2.1.2 Quadrats d’échantillonnage	7
2.1.3 Épaisseur du dépôt tourbeux	9
2.1.4 Conditions hydrologiques	9
2.1.5 Niveau d’envahissement	10
2.1.6 Analyse statistique des données.....	10
2.2 Impact du bouleau sur l’évapotranspiration d’une tourbière	11
2.2.1 Site d’étude	11
2.2.2 Mesure du taux de transpiration du bouleau et du taux d’évaporation de la tourbe	11
2.2.3 Mesure de la surface foliaire totale.....	14
3.0 Résultats	16
3.1 Facteurs favorisant l’envahissement par le bouleau	16
3.1.1 Caractéristiques des différentes sections de la tourbière de Saint-Henri-de- Lévis.....	16
3.1.2 Modèles prédictifs des facteurs favorisant l’envahissement par le bouleau	19
3.2 Impact du bouleau sur l’évapotranspiration d’une tourbière	21
3.2.1 Taux d’évaporation et de transpiration	21
3.2.2 Surface foliaire totale.....	23
3.2.3 Quantité d’eau perdue par transpiration du bouleau	24
4.0 Discussion	25
4.1 Dynamique de l’envahissement du bouleau	25
4.2 Gestion du bouleau envahisseur.....	29
5.0 Bibliographie	32

Liste des figures

Figure 1 : Localisation du site d'étude: tourbière de Saint-Henri-de-Lévis	7
Figure 2 : Photographies des différentes sections étudiées dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis.....	8
Figure 3 : Expérience sur la transpiration dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis.....	12
Figure 4 : Relation entre la surface foliaire moyenne d'un bouleau et le diamètre de son tronc dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis	23
Figure 5 : Structure du peuplement de bouleaux du champ d'aspiration où l'expérience sur la mesure du taux de transpiration du bouleau a pris place dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis	24
Figure 6 : Schéma hypothétique représentant la dynamique de l'envahissement d'un champ de tourbe par le bouleau.....	28

Liste des tableaux

Tableau I :	Densités maximales de bouleaux observées dans différentes tourbières exploitées puis abandonnées du Québec et du Nouveau-Brunswick, dans l'Est du Canada	4
Tableau II :	Statistiques descriptives de l'épaisseur du dépôt tourbeux dans chaque section de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, ainsi que pour l'ensemble des 80 quadrats d'échantillonnage	16
Tableau III :	Statistiques descriptives du niveau de la nappe phréatique dans chaque section de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, ainsi que pour l'ensemble des 80 quadrats d'échantillonnage	17
Tableau IV :	Statistiques descriptives du contenu volumique en eau de la tourbe dans chaque section de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, ainsi que pour l'ensemble des 80 quadrats d'échantillonnage	17
Tableau V :	Statistiques descriptives des densités de bouleaux calculées dans chaque section de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, ainsi que pour l'ensemble des 80 quadrats d'échantillonnage	18
Tableau VI :	Statistiques descriptives des surfaces terrières des bouleaux calculées dans chaque section de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, ainsi que pour l'ensemble des 80 quadrats d'échantillonnage.....	18
Tableau VII :	Statistiques descriptives de la proportion de bouleaux avec indices de dépérissement dans chaque section de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, ainsi que pour l'ensemble des 80 quadrats d'échantillonnage	19
Tableau VIII :	Résultats de l'analyse de régression linéaire multiple pour les modèles de densité de bouleaux, de surface terrière totale de bouleaux et de la proportion de bouleaux avec indices de dépérissement (tourbière de Saint-Henri-de-Lévis).....	20
Tableau IX :	Moyennes des taux d'évaporation de la tourbe et de transpiration du bouleau calculées chaque semaine (été 2005) dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, ainsi que le rapport entre ces deux taux	22

1.0 Introduction

Les arbres possèdent un certain nombre de caractéristiques qui font d'eux de bons colonisateurs. Plusieurs espèces d'arbre tolèrent en effet de grandes variations des conditions du milieu. Bon nombre d'espèces possèdent aussi des mécanismes de dissémination très efficaces de leurs fruits ou de leurs graines qui permettent aux arbres d'étendre rapidement leurs colonies sur de grandes distances (Petit *et al.*, 2004). De telles caractéristiques ont permis à plusieurs espèces d'arbre d'agrandir en peu de temps leur aire de répartition suite à leur utilisation en foresterie, en agriculture ou en horticulture, ou pour la restauration d'écosystèmes dégradés (Binggeli, 1996; Richardson *et al.*, 1994). L'introduction d'arbres exotiques un peu partout dans le monde a permis d'améliorer de façon significative la situation économique de plusieurs pays, mais la prolifération rapide de certaines espèces hors des lieux de plantation n'a toutefois pas été sans engendrer çà et là certains coûts environnementaux importants (Richardson, 1998).

La conséquence la plus visible de l'envahissement d'un écosystème par les arbres est sans doute le changement de la structure de végétation du site (Gordon, 1998; Katz & Shafroth, 2003; García-Robledo & Murcia, 2005), d'autant plus que certaines espèces envahissantes forment des colonies monospécifiques (Braithwaite *et al.*, 1989; Richardson *et al.*, 1994; Bruce *et al.*, 1997; Turner *et al.*, 1998). Dans certains cas, l'envahissement peut avoir des conséquences positives. Par exemple, sur les terres agricoles dégradées de Porto Rico, l'établissement de monocultures d'arbres exotiques a favorisé le retour de plantes indigènes (Lugo, 2004). Cependant, dans la plupart des cas, l'invasion aura un impact négatif sur l'écosystème en altérant le régime hydrologique, le régime des perturbations, le taux de décomposition de la matière organique, la vitesse de recyclage des nutriments et la diversité végétale (van Wilgen & Richardson, 1985; Vitousek & Walder, 1989; Jean & Bouchard, 1991; Richardson *et al.*, 1994; Le Maitre *et al.*, 1996; Mack & D'Antonio, 1998; Katz & Shafroth, 2003; Serbesoff-King, 2003; Hugues & Denslow, 2005).

Les arbres envahisseurs ont un impact appréciable surtout sur la ressource eau. L'Afrique du Sud est au prise avec ce problème depuis déjà bon nombre d'années (Le Maitre *et al.*, 2000; Görgens & Wilgen, 2004). Une grande partie des écosystèmes

riverains sud-africains sont envahis par des arbres exotiques, comme les pins, les eucalyptus ou les acacias. Ces arbres interceptent les eaux de ruissellement, ce qui a pour conséquence de réduire de façon significative le débit des rivières (Le Maitre *et al.*, 2002; Moran *et al.*, 2005). De plus, le remplacement de la végétation indigène (surtout herbacée et arbustive) par des arbres augmente de manière significative les pertes d'eau par transpiration (Dye *et al.*, 2001; Dye & Jarman, 2004; Görgens & Wilgen, 2004). On observe le même genre de phénomène dans l'Ouest des États-Unis où une grande partie des écosystèmes riverains sont envahis par les tamaris (*Tamarix* spp.). Ces arbres sont reconnus pour leur haut taux de transpiration et pour les grandes quantités d'eau qu'ils absorbent (Devitt *et al.*, 1997; Shafroth *et al.*, 2005). Une invasion de tamaris se traduit souvent par un abaissement du niveau de la nappe phréatique, un assèchement des sources d'eau du voisinage et une baisse du débit des rivières et du niveau d'eau des lacs. En fait, la quantité d'eau perdue par transpiration par les tamaris est comparable au total des précipitations annuelles dans certaines régions envahies (Zavaleta, 2000).

L'impact des arbres envahisseurs sur le régime hydrologique est particulièrement prononcé dans les milieux humides puisque l'eau est un élément-clé de la formation et du maintien de ces écosystèmes (Mitsch & Gosselink, 2000). En outre, comme plusieurs de ces milieux sont affectés par différentes activités anthropiques comme l'agriculture, la coupe forestière ou la construction domiciliaire, cela les rend encore plus vulnérables aux impacts des invasions biologiques (Brinson & Malvárez, 2002; Moore, 2002; Zedler & Kercher, 2005). C'est notamment le cas des tourbières exploitées à des fins horticoles. Pour prélever la tourbe servant à la fabrication de terreaux, les sites doivent être drainés et leur végétation complètement enlevée. La majeure partie du dépôt tourbeux est ensuite extraite du sol pendant plusieurs années par des aspirateurs géants. Une fois l'extraction terminée, les tourbières sont abandonnées. Toutes ces perturbations ont pour conséquence de modifier grandement les principales caractéristiques de ces écosystèmes. Les tourbières abandonnées après extraction de la tourbe ont une nappe phréatique plus basse et qui fluctue davantage que celle des tourbières non perturbées (Price, 2001). Elles emmagasinent aussi beaucoup moins d'eau que les tourbières non exploitées. Comme elle est sèche, la tourbe de surface de ces tourbières est très susceptible à l'oxydation (Rocheport, 2001). Enfin, le sol dénudé des tourbières abandonnées est plus sujet aux

fluctuations de température et à l'érosion éolienne (Salonen, 1987; Price, 2001; Rochefort, 2001). Ces caractéristiques en font des habitats peu propices à la croissance des plantes (Campbell *et al.*, 2003, Lavoie *et al.*, 2005b). Malgré tout, certains végétaux tirent avantage des caractéristiques de ces habitats, au point même de devenir envahissants, ce qui est le cas des bouleaux (*Betula* spp.).

L'invasion des tourbières abandonnées par les bouleaux est un phénomène qui a souvent été observé au Québec, mais aussi ailleurs au Canada ainsi qu'en Europe (Jonsson-Ninniss & Middleton, 1991; Meade, 1992; Lavoie & Rochefort, 1996; Lavoie & Saint-Louis, 1999; Bérubé & Lavoie, 2000; Girard *et al.*, 2002; Diamond *et al.*, 2003; Manning *et al.*, 2004). Les bouleaux sont des arbres de hauteur moyenne qu'on trouve dans les zones tempérées, boréales et nordiques de l'hémisphère nord. Ils possèdent une variabilité génétique très élevée et forment fréquemment des hybrides (Furrow, 1997). Ce sont des arbres cosmopolites qui peuvent tolérer une grande variété de conditions environnementales et qui peuvent pousser sur des sols sableux ou organiques, secs ou humides (Bergeron *et al.*, 1988; Farrar, 1996). Les fruits des bouleaux possèdent deux ailes latérales membraneuses plus larges que la partie centrale du fruit, ce qui leur permet d'être facilement disséminés par le vent sur de grandes distances et de coloniser rapidement de nouveaux habitats (Farrar, 1996; Furrow, 1997; Fralish & Franklin, 2002; Campbell *et al.*, 2003). Enfin, les bouleaux possèdent des taux d'absorption de nutriments et de photosynthèse élevés qui leur permettent de pousser rapidement en présence de lumière (Walters *et al.*, 1993). Les conditions difficiles qui prévalent dans une tourbière à l'abandon ne sont généralement pas propices à l'établissement et la croissance des végétaux, mais le bouleau semble posséder des caractéristiques qui lui permettent de tolérer ces conditions, comme l'indiquent les grandes densités de bouleaux observées dans les tourbières abandonnées du Québec et du Nouveau-Brunswick, dans l'Est du Canada (Tableau I).

Une invasion de bouleaux dans une tourbière pourrait avoir d'importantes conséquences écologiques. Une colonie dense de bouleaux pourrait être responsable, du moins temporairement, d'une baisse du niveau de la nappe phréatique en raison de l'importante quantité d'eau puisée dans le sol par les racines, puis perdue par

transpiration (Heathwaite, 1995). En plus des pertes par transpiration, la présence de bouleaux peut aussi avoir pour conséquence de diminuer la quantité de précipitations atteignant le sol (Ingram, 1983). Par exemple, les pertes d'eau par interception dans un peuplement de bouleaux âgés d'environ 20 ans peuvent excéder 30 % du total et se traduire par une nappe phréatique dont le niveau est 20 % inférieur à celui des sites où l'on trouve principalement des plantes herbacées (Price *et al.*, 2003). Cette baisse de la nappe phréatique pourrait subséquemment empêcher le retour d'espèces typiques des tourbières et nuire à la restauration de l'écosystème. On a souvent fait état de l'impact que pourrait avoir le bouleau sur l'hydrologie d'un site (Diamond *et al.*, 2003; Tomassen *et al.*, 2004), mais pratiquement aucune donnée ne permet d'appuyer l'hypothèse d'un impact palpable du bouleau sur la quantité d'eau qu'on trouve dans une tourbière. En fait, on ne connaît même pas la dynamique du processus d'envahissement des tourbières par le bouleau.

Tableau I. Densités maximales de bouleaux observées dans différentes tourbières exploitées puis abandonnées du Québec et du Nouveau-Brunswick, dans l'Est du Canada (E. Fay et C. Lavoie, données non publiées).

Tourbière et année de l'inventaire de terrain	Densité (ind./ha)	Années écoulées depuis l'abandon de la tourbière
Cacouna, Qc (2004)	6 300	5
Rivière-Ouelle, Qc (1998)	44 750	2
Saint-Henri-de-Lévis, Qc (2005)	47 600	10
Maisonnette, N.-B. (2003)	78 100	3
Saint-Charles-de-Bellechasse, Qc (2004)	660 900	9

Mon étude vise donc, dans un premier temps, à déterminer quels sont les facteurs qui favorisent (ou pas) de grandes densités de bouleaux dans les tourbières exploitées à l'abandon. J'émetts l'hypothèse que la densité de bouleaux sera d'autant plus grande que le dépôt tourbeux sur lequel s'installe un peuplement sera mince et la nappe phréatique loin de la surface du sol. Les bouleaux devraient donc proliférer davantage en conditions sèches et là où les racines peuvent avoir facilement accès aux ressources nutritives du sol minéral sous-jacent. Par ailleurs, puisque les conditions qui prévalent dans une tourbière exploitée à l'abandon sont plutôt hostiles à la croissance des plantes et que les quantités d'éléments nutritifs qu'on y trouve sont très faibles, j'émetts l'hypothèse qu'on observe

davantage de bouleaux avec signes de dépérissement dans les peuplements âgés (> 15 ans) ou là où les conditions de croissance sont plus difficiles (dépôt de tourbe épais, nappe phréatique élevée). Mon étude vise aussi, dans un deuxième temps, à déterminer la quantité d'eau perdue par transpiration par le bouleau dans une tourbière à l'abandon massivement envahie par l'arbre. Dans ce cas-ci, j'émetts l'hypothèse qu'il y a plus d'eau perdue par transpiration du bouleau qu'il y en aurait par évaporation si le site n'avait pas été envahi (tourbe nue). La réalisation de cette étude permettra de statuer sur le danger réel que représentent les invasions de bouleaux dans les tourbières et d'élaborer, s'il y a lieu, des stratégies pour en minimiser les impacts.

2.0 Méthodes

2.1 Facteurs favorisant l'envahissement par le bouleau

L'objectif de la première partie de ce travail est de comprendre le processus d'envahissement des tourbières abandonnées par les bouleaux, en essayant notamment d'identifier quels sont les facteurs qui influencent la densité des bouleaux et leur dépérissement. Les différentes sections exploitées par aspirateur puis abandonnées de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, au Québec, constituent des sites pertinents pour ce genre d'étude puisqu'on y trouve une grande variabilité au niveau des principales caractéristiques abiotiques (niveau de la nappe phréatique, épaisseur du dépôt tourbeux résiduel), mais aussi différentes durées d'abandon. On y observe donc différents niveaux d'envahissement et de dépérissement du bouleau.

2.1.1 Site d'étude

La tourbière de Saint-Henri-de-Lévis (46°42' N., 71°03' O.) est située sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent, à 16 km au sud-est de la ville de Québec (Figure 1). Sa superficie couvre environ 150 ha. La station météorologique de la ville de Québec (46°48' N., 71°23' O.) indique que la température annuelle moyenne est de 4 °C. Janvier est le mois le plus froid avec une température moyenne de -13 °C et juillet le mois le plus chaud avec une température moyenne de 19 °C. La moyenne des précipitations annuelles totales est de 1 230 mm, dont 26 % tombent sous forme de neige (Environnement Canada, 2005).

L'exploitation de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis a commencé à la fin des années 1960. Pour récolter la tourbe, la méthode manuelle de coupe par blocs a été employée jusqu'à ce qu'elle soit remplacée par la méthode avec aspirateurs au début des années 1970. La technique par aspirateur est encore utilisée de nos jours et a permis à la compagnie *Premier Horticulture Inc.* d'exploiter près de 80 % (environ 120 ha) de la superficie de la tourbière (Marcoux, 2000). En 2003, environ 40 % de la section exploitée était à l'abandon (Lavoie *et al.*, 2005a). Certains secteurs à l'abandon ont été massivement envahis par la linaigrette (*Eriophorum vaginatum*), alors que d'autres ont

plutôt été colonisés par les bouleaux, comme le bouleau à papier (*Betula papyrifera*) et le bouleau gris (*Betula populifolia*).

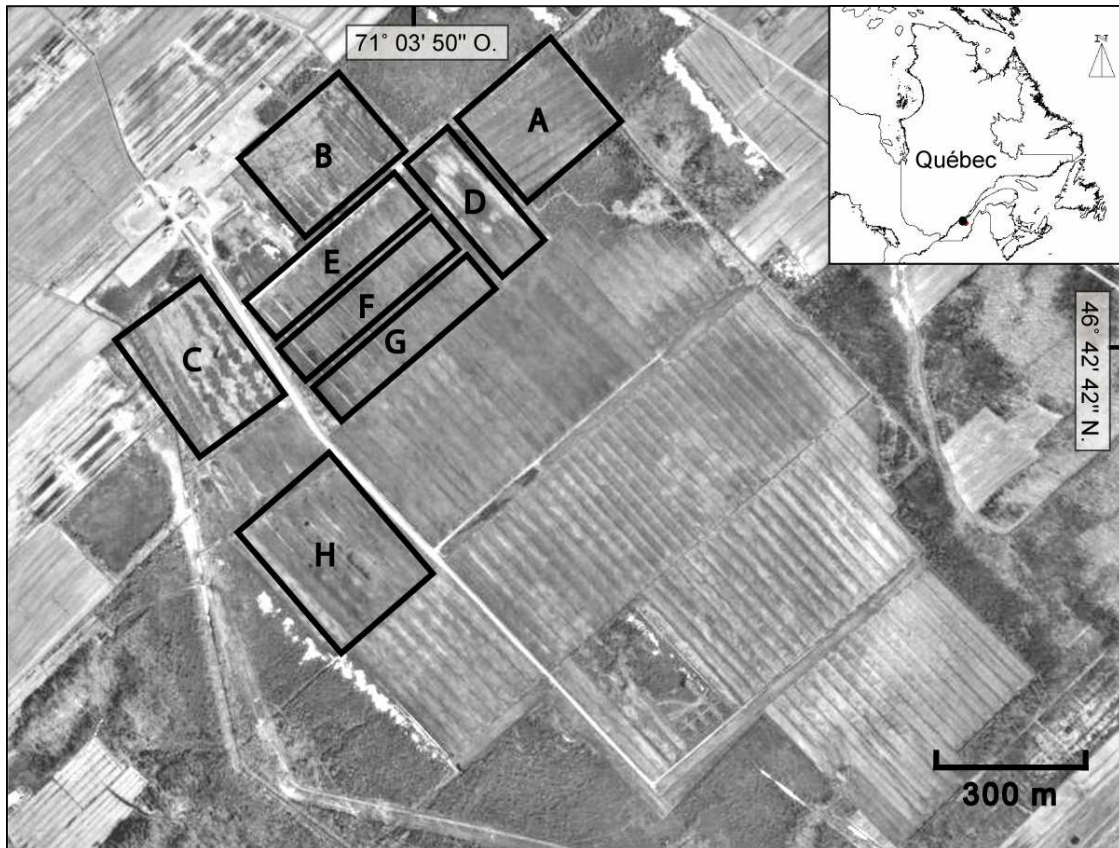


Figure 1. Localisation du site d'étude: tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, Québec, Canada. Sur la photographie aérienne, prise le 3 mai 1993, les rectangles noirs et les lettres indiquent les différentes sections étudiées. La section A a été abandonnée en 1995, la section B en 1985, la section C en 1982, les sections D, E, F et G en 1989 et la section H en 1993 (photographie : Ministère des Ressources naturelles du Québec, HMQ-106-12, 21L34).

2.1.2 Quadrats d'échantillonnage

Au sein de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, huit sections exploitées par aspirateur puis abandonnées ont été distinguées (sections A à H) en fonction des dates d'abandon (Figures 1 et 2). La seule exception à cette règle est la grande section abandonnée en 1989 qui a été subdivisée en quatre sections plus petites (D, E, F et G) en raison de certains travaux qui ont été effectués à cet endroit. En effet, lors de l'abandon de cette section, un canal de drainage très profond a été creusé entre la section D et les

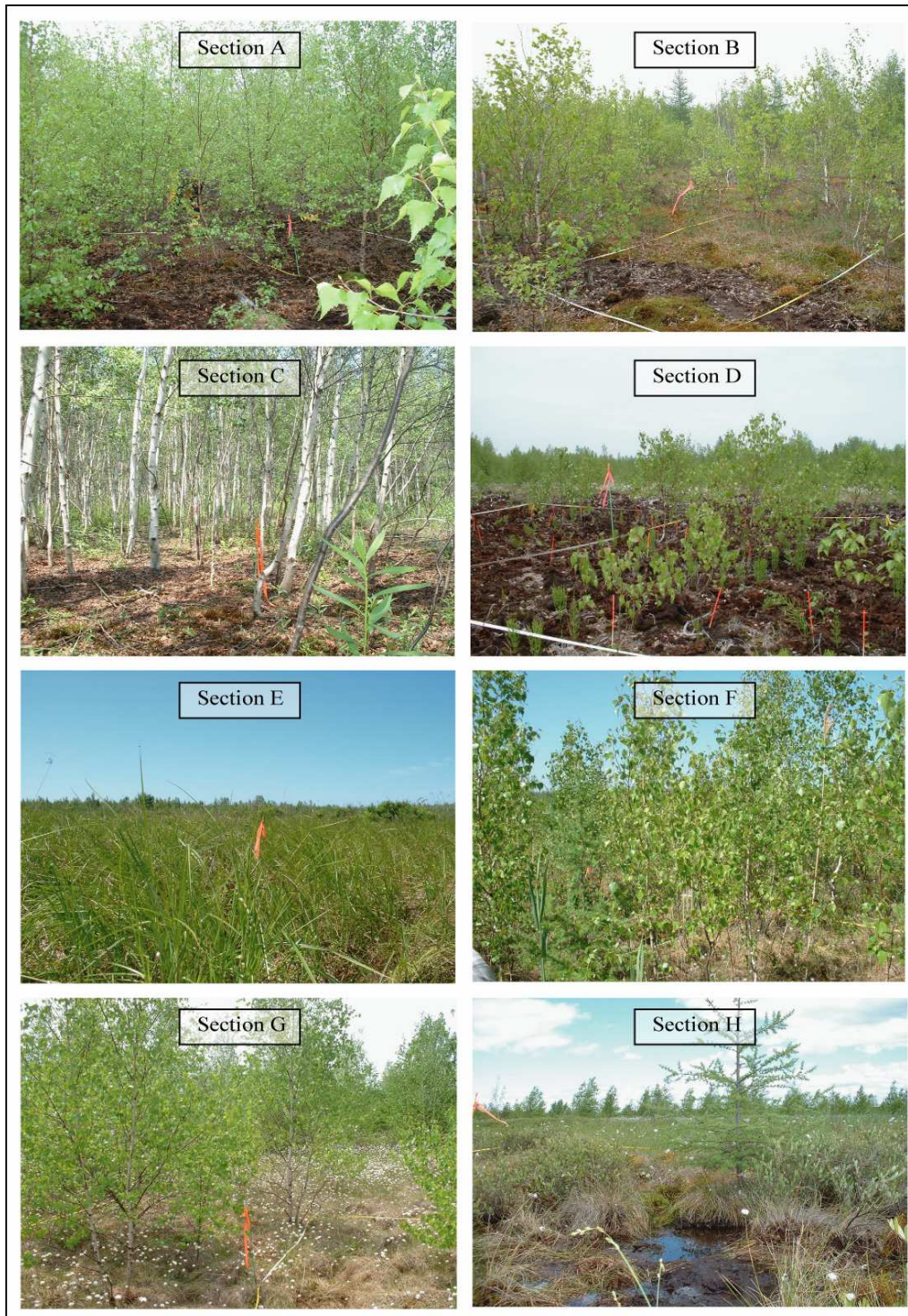


Figure 2. Photographies des différentes sections étudiées dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, Québec, Canada. La grande variabilité des caractéristiques abiotiques (niveau de la nappe phréatique, épaisseur du dépôt tourbeux résiduel) combinée aux différentes durées d'abandon ont permis l'établissement de bouleaux à des densités variables, allant de très fortes (sections A et B) à très faibles (section E) (photographies : E. Fay).

sections E, F et G pour permettre le drainage de la section adjacente toujours exploitée. Ensuite, les canaux de drainage secondaires des sections E, F et G ont été bloqués afin d'y hausser le niveau de la nappe phréatique et d'y favoriser la régénération naturelle. Finalement, deux remblais de tourbe ont été construits afin de diminuer l'effet de pente sur l'eau en surface, divisant ainsi les anciens champs d'exploitation en trois et créant par le fait même les sections E, F et G.

Tous les champs d'aspiration (champs de tourbe entre deux canaux de drainage; voir Figure 1) de chaque section ont été divisés sur leur longueur en segments de 15 m. Un numéro a été attribué à chacun des segments. Dix numéros (ou segments) ont été sélectionnés au hasard dans chacune des huit sections. Un quadrat de 5 × 5 m a été placé au centre de chacun des segments choisis pour y récolter des données sur les bouleaux et leur habitat. Un grand total de 80 quadrats a donc été échantillonné.

2.1.3 Épaisseur du dépôt tourbeux

L'épaisseur du dépôt tourbeux sous chaque quadrat a été mesurée en enfonçant une tige métallique dans la tourbe jusqu'au sol minéral. Lorsqu'il était difficile de détecter avec précision le contact de la tige avec le sol minéral, une tarière a été utilisée pour mesurer l'épaisseur de la tourbe. Une tarière permet de creuser et de retirer une partie du dépôt tourbeux de façon à trouver exactement à quelle profondeur se situe le sol minéral. Cinq mesures par quadrat (aux quatre coins et au centre du quadrat) ont été prises.

2.1.4 Conditions hydrologiques

Afin de déterminer les conditions hydrologiques propres à chaque niveau d'invasion, plusieurs mesures ont été effectuées au cours de l'été 2005. Le niveau de la nappe phréatique près de chaque quadrat a été mesuré à trois reprises, soit au début (31 mai), au milieu (12 juillet) et à la fin (23 août) de l'été. Pour ce faire, des tuyaux de plastique perforés ont été recouverts d'un tissu de nylon (pour empêcher la pénétration de la matière organique) puis insérés dans la tourbe jusqu'au sol minéral dans un trou creusé quelques mètres à l'extérieur de chaque quadrat. Le niveau de la nappe phréatique a ensuite été mesuré à l'aide d'un ruban muni d'une sonde électrique détectant la présence de l'eau une fois le ruban enfoncé dans le tuyau. Au même moment, le contenu

volumique en eau de la tourbe (volume d'eau divisé par le volume de sol, exprimé en pourcentage) a été mesuré à l'aide d'un appareil *Hydrosense*[®] (Decagon Devices Inc., Washington, États-Unis) muni d'une sonde de 12 cm de long. La mesure a été prise sur les 12 cm supérieurs de la tourbe en enfonçant verticalement la sonde dans la surface du dépôt organique. Cinq mesures ont été prises à cinq endroits différents dans chaque quadrat, soit aux quatre coins et au centre du quadrat, pour un total de 25 mesures par quadrat. Puisque les données obtenues par l'appareil *Hydrosense*[®] nécessitent une calibration supplémentaire pour chaque type de sol, elles ont été transformées à l'aide de l'équation établie par Marcoux (2000) pour la tourbe de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis de façon à obtenir le véritable contenu volumique en eau pour ce sol tourbeux.

2.1.5 Niveau d'envahissement

Au cours de l'été 2005, le diamètre de tous les bouleaux (taille de 20 cm et plus) de chaque quadrat a été mesuré à la base du tronc à l'aide d'un pied à coulisse électronique pour les petits arbres et d'un ruban diamétral pour les plus gros individus. Ces données ont servi à calculer la surface terrière totale des bouleaux pour chaque quadrat. De plus, la présence ou non d'indices de dépérissement (variable binaire) a été notée. La présence d'une grande quantité de feuilles mortes (> 20 %), de branches mortes (> 20 %), ou d'une cime morte a été considérée comme indice de dépérissement. Lorsqu'un individu possédait plusieurs tiges principales, ce qui est courant chez le bouleau gris, les données ont été prélevées pour chacune des tiges. Les plantules ou les gaules (bouleaux dont la taille était inférieure à 20 cm) ont pour leur part simplement été dénombrés.

2.1.6 Analyse statistique des données

La régression linéaire multiple a été utilisée afin d'identifier quels sont les facteurs (durée d'abandon, épaisseur du dépôt tourbeux, niveau de la nappe phréatique, contenu volumique en eau) qui influencent de façon significative la densité et la surface terrière totale des bouleaux des différents sites (Beguin, 1979; Hair *et al.*, 1987; Zar 1999). Une variante de cette méthode d'analyse, soit l'analyse de régression linéaire multiple pondérée, a été utilisée pour identifier les facteurs qui influencent le pourcentage de bouleaux avec indices de dépérissement (Robinson, 1956). Cette méthode consiste à pondérer la variable

(le pourcentage) par l'effectif (le nombre de bouleaux sur lesquels sont colligées les informations), de manière à donner davantage de poids dans l'analyse aux quadrats aux effectifs élevés, donc là où le pourcentage reflète probablement de manière plus fidèle la réalité. Outre cette modification, cette analyse est identique à l'analyse de régression linéaire multiple standard. Toutes ces analyses ont été effectuées à l'aide du logiciel SPSS (SPSS, 2003) en utilisant la méthode *enter* de la régression linéaire. Toutes les conditions nécessaires à l'analyse de régression linéaire multiple (linéarité de la relation, normalité des résidus, homoscedasticité des résidus et absence de multicollinéarité) ont été vérifiées au préalable pour chacun des modèles.

2.2 Impact du bouleau sur l'évapotranspiration d'une tourbière

L'objectif de la deuxième partie de ce travail est de déterminer si un envahissement massif par le bouleau a un impact quelconque sur le taux d'évapotranspiration d'une tourbière exploitée et abandonnée. Un fort impact (forte perte d'eau par transpiration) pourrait avoir des répercussions sérieuses sur les conditions d'établissement des autres plantes de tourbières et ainsi retarder de manière significative la régénération ou recolonisation végétale spontanée de l'écosystème. Cette recherche comporte deux volets, soit la mesure du taux de transpiration du bouleau et du taux d'évaporation de la tourbe et la mesure de la surface foliaire totale du site d'étude.

2.2.1 Site d'étude

Cette partie de la recherche a aussi pris place dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, notamment parce qu'on y trouve des sites fortement envahis par le bouleau. Après avoir observé les différentes sections de la tourbière, la section A (Figure 1) fut choisie pour cette étude puisqu'on y trouve les plus grandes densités de bouleau (Figure 3) et que ceux-ci présentent peu de signes de dépérissement. C'est donc probablement à cet endroit que l'impact du bouleau sur l'évapotranspiration est maximal, et plus facile à évaluer.

2.2.2 Mesure du taux de transpiration du bouleau et du taux d'évaporation de la tourbe

À chaque semaine de l'été 2005, du 30 mai au 22 août (12 semaines), six petits bouleaux à papier d'une taille de 25 à 50 cm produits en pépinière ont été placés

individuellement dans des pots de plastique étanches avec terreau de tourbe de sphaigne (Figure 3). Douze autres pots ont pour leur part été uniquement remplis de tourbe. Les pots avec bouleau ont été utilisés pour mesurer le taux de transpiration de ces arbres. La moitié des pots sans bouleau a servi à mesurer le taux d'évaporation de la tourbe nue et l'autre moitié a été utilisée à titre de témoin. Afin d'éviter que l'eau ne soit un facteur limitant, tous les pots ont été abondamment arrosés avant l'expérience. Toutefois, les pots ne devaient pas non plus être inondés, ce qui a été vérifié manuellement.



Figure 3. Expérience sur la transpiration dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, Québec, Canada : **A)** pots scellés, avec ou sans bouleau; **B)** pots recouverts de papier d'aluminium et placés dans le sol; **C)** site où ont été installés les pots, soit dans une clairière de la section A; **D)** aperçu de la section A, dans un endroit où la densité des bouleaux est grande. Cette dernière photographie donne un aperçu assez fidèle de la densité des bouleaux qu'on observe dans l'ensemble de la section A (photographies : E. Fay).

Au début de chacune des 12 semaines, les contenants avec bouleaux et ceux servant de témoins ont été scellés avec une pellicule de plastique pour éviter les pertes d'eau par évaporation, la pellicule laissant bien sûr passer la tige du bouleau. Cette pellicule a par la

suite été recouverte d'un morceau de papier d'aluminium pour minimiser la hausse de température créée par la pose de la pellicule (effet de serre chaude). Chaque pot a été pesé avec une balance de haute précision (0,01 g) et son poids initial noté. Les pots ont ensuite été placés dans des trous creusés dans la tourbe, à un endroit de la section A où les bouleaux voisins ne portaient pas ombrage. Les pots ont été disposés le long de six rangées de trois trous équidistants d'un mètre. Un pot témoin, un pot avec bouleau et un pot sans bouleau ont été placés dans chaque rangée de façon aléatoire. Les pots ont à nouveau été pesés 72 heures plus tard. La différence de poids des pots contenant les bouleaux correspondait à la quantité d'eau perdue par transpiration des feuilles. La différence de poids des pots non scellés contenant uniquement de la tourbe correspondait à la quantité d'eau perdue par évaporation de la tourbe nue. Les pots scellés sans bouleau ne devaient, en principe, pas perdre d'eau (donc de poids) au cours de l'expérience. Cette expérience a été répétée chaque semaine en utilisant de nouveaux bouleaux placés toujours au même endroit. Les précipitations totales reçues durant les 72 heures de chaque répétition de l'expérience ont été mesurées à l'aide d'un pluviomètre installé sur le site. Les valeurs minimale et maximale de température mesurées durant chaque journée de l'expérience ont été obtenues à partir de la station météorologique de Québec.

Une fois chaque expérience de terrain terminée (c'est-à-dire 72 heures après la pose des pots dans la tourbière), les bouleaux ont été retirés de leurs pots et leurs feuilles détachées afin de calculer la surface foliaire projetée de chaque individu à l'aide d'un appareil spécialisé (*Area Meter LI-COR[®] Model 3100*). Connaissant la quantité d'eau perdue par transpiration pour une période de temps déterminée (72 heures) et la surface foliaire, il a alors été possible de calculer le taux de transpiration par unité de surface foliaire de chaque bouleau ($\text{g d'eau m}^{-2} \text{s}^{-1}$) à l'aide de l'équation suivante :

$$(1) \quad T = \Delta p \times t^{-1} \times S^{-1}$$

Où Δp = différence de poids entre la pesée initiale et finale du pot (1 g d'eau = 1 000 mm³ d'eau)

t = temps exact d'exposition sur le terrain (jour)

S = surface foliaire (mm²)

T = taux de transpiration (mm jour⁻¹)

Pour ce qui est des taux d'évaporation de la tourbe, les mêmes équations ont été utilisées, mais la surface foliaire a été remplacée par la surface de tourbe des pots non scellés. Ces données ont ensuite servi à calculer le taux moyen d'évaporation (tourbe) et le taux moyen de transpiration (bouleau) pour chacune des 12 semaines de l'expérience. Les moyennes hebdomadaires des taux d'évaporation et de transpiration ont été comparées à l'aide d'un test de comparaison des moyennes de Student (Zar, 1999). Afin de connaître la différence d'ordre de grandeur entre les taux d'évaporation et de transpiration, un rapport entre les deux a aussi été calculé.

2.2.3 Mesure de la surface foliaire totale

Connaître la quantité d'eau perdue par unité de surface foliaire constitue un point de départ dans une étude sur la transpiration, mais cela ne nous permet pas de connaître la quantité totale d'eau perdue par transpiration par une population de bouleaux. Afin d'évaluer de manière adéquate cette quantité, il importe d'estimer la surface foliaire totale de la population de bouleau par unité de surface.

La première étape pour parvenir à ce résultat a été d'estimer la surface foliaire moyenne d'une feuille de bouleau. Pour ce faire, le 7 juillet 2005, 100 feuilles ont été cueillies (maximum d'une feuille par arbre) sur le site d'étude. La procédure de récolte consistait à amasser des feuilles provenant de bouleaux de toutes tailles, cueillies tout autant dans le bas, le centre ou le haut des arbres, et ce, de manière à obtenir un échantillon de feuilles aléatoire et représentatif de l'ensemble. La surface foliaire de chaque feuille a ensuite été mesurée à l'aide du *Area Meter LI-COR® Model 3100*. Par la suite, un transect de 250 m a été établi le long d'un champ d'aspiration de la section A et un quadrat de 5 × 5 m a été délimité à tous les 25 m (neuf en tout) afin d'obtenir des données sur les bouleaux pour l'ensemble du champ d'aspiration. Dans chaque quadrat, le diamètre de tous les bouleaux a été mesuré au niveau du collet. Cinq bouleaux par quadrat ont ensuite été choisis de façon aléatoire. Toutes les feuilles des bouleaux sélectionnés ont été dénombrées. En multipliant le nombre de feuilles par la surface foliaire moyenne d'une feuille (calculée à l'aide de l'échantillon de 100 feuilles), on obtient une estimation de la surface foliaire totale d'un arbre. Avec ces données, il a été possible d'établir la relation qui existe entre la surface foliaire totale d'un bouleau et le

diamètre de son tronc. Connaissant le diamètre de chaque bouleau du quadrat, on peut alors calculer la surface foliaire totale du quadrat et, par la suite, extrapoler les résultats pour l'ensemble de la section à l'étude.

3.0 Résultats

3.1 Facteurs favorisant l'envahissement par le bouleau

3.1.1 Caractéristiques des différentes sections de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis

Dans les différentes sections de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, l'épaisseur du dépôt tourbeux variait de 25 à 188 cm. Dans 67 % des cas, le dépôt tourbeux avait une épaisseur variant de 44 à 101 cm (Tableau II). Certaines sections de la tourbière (A, B, C et D) étaient très sèches au début de l'été 2005 (nappe phréatique jusqu'à 70 cm sous la surface du sol), alors que d'autres (E, F, G et H) étaient beaucoup plus humides avec, dans certains cas, une nappe phréatique au-dessus de la surface du sol (Tableau III). Toutes les sections se sont asséchées au cours de l'été 2005, surtout après le 12 juillet. À la fin de l'été (23 août), la nappe phréatique était sous la surface du sol dans toutes les sections. Dans certains quadrats d'échantillonnage, elle était très près de cette surface (section H), mais elle pouvait aussi se situer à plus de 80 cm de la surface à d'autres endroits (section D). Des tendances similaires ont été observées au niveau du contenu volumique en eau de la tourbe, les sections A, B, C et D ayant eu en général des contenus moins élevés au début de l'été et à la mi-saison que les section E, F, G et H (Tableau IV). Les différences étaient toutefois moins importantes à la fin de l'été.

Tableau II. Statistiques descriptives (moyenne, écart-type, valeurs minimale et maximale) de l'épaisseur du dépôt tourbeux dans chaque section de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, Québec, Canada, ainsi que pour l'ensemble des 80 quadrats d'échantillonnage répartis également dans les huit sections.

Section	Épaisseur du dépôt tourbeux (cm)			
	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.
A	95	27	69	145
B	58	16	32	85
C	81	8	69	94
D	66	15	45	96
E	40	7	25	49
F	58	8	47	75
G	75	11	59	90
H	107	44	59	188
Toutes	72	28	25	188

Tableau III. Statistiques descriptives (moyenne, écart-type, valeurs minimale et maximale) du niveau de la nappe phréatique (cm) au cours de l'été 2005 dans chaque section de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, Québec, Canada, ainsi que pour l'ensemble des 80 quadrats d'échantillonnage répartis également dans les huit sections. Une valeur négative indique un niveau au-dessus de la surface du sol.

Section	31 mai 2005				12 juillet 2005				23 août 2005			
	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.
A	31,4	8,9	18,5	42,0	34,9	10,2	17,0	54,0	64,2	11,1	37,0	74,5
B	23,3	5,8	14,0	32,0	24,6	7,5	14,0	39,0	42,8	7,7	33,5	59,0
C	39,4	9,7	20,0	57,0	38,1	9,4	18,5	54,0	52,9	7,6	44,0	69,0
D	44,0	13,3	25,5	70,0	46,5	11,0	25,0	57,5	67,8	12,9	41,5	81,5
E	4,7	4,9	-3,0	14,5	4,0	5,0	-1,5	15,0	31,2	10,2	11,0	49,0
F	14,4	12,8	-4,0	38,0	15,4	14,1	1,0	42,5	36,0	10,7	24,0	54,5
G	14,7	10,6	6,0	34,0	13,8	11,4	1,5	35,5	36,3	13,4	23,5	61,5
H	19,8	16,2	-2,5	40,0	13,3	17,9	-9,0	37,0	25,4	23,7	0,5	60,0
Toutes	23,9	16,4	-4,0	70,0	23,8	17,6	-9,0	57,5	43,3	19,0	0,5	81,5

Tableau IV. Statistiques descriptives (moyenne, écart-type, valeurs minimale et maximale) du contenu volumique en eau (%) de la tourbe (couche de tourbe de surface de 12 cm d'épaisseur) dans chaque section de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, Québec, Canada, ainsi que pour l'ensemble des 80 quadrats d'échantillonnage répartis également dans les huit sections.

Section	31 mai 2005				12 juillet 2005				23 août 2005			
	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.
A	78	4	73	85	76	4	69	84	72	6	63	82
B	73	6	65	81	73	5	63	78	71	4	62	74
C	68	3	65	76	70	3	65	76	69	4	63	76
D	65	4	59	69	66	5	60	75	63	4	55	68
E	87	2	83	89	82	4	78	89	72	4	68	78
F	82	6	70	89	80	4	70	86	73	3	67	79
G	84	6	72	89	80	5	69	87	76	4	68	82
H	84	8	69	94	85	6	74	91	83	6	73	91
Toutes	78	9	59	94	76	8	60	91	72	7	55	91

Le degré d'envahissement par le bouleau dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis variait beaucoup selon les sections et au sein même d'une section. La densité des bouleaux (individus dont la hauteur est de plus de 20 cm) variait en effet de 0 et 47 600 individus par hectare (Tableau V). Pour l'ensemble des quadrats d'échantillonnage, la valeur médiane était de 6 600 individus par hectare. La surface terrière au collet des bouleaux (Tableau VI) était évidemment tout aussi variable, avec des valeurs s'échelonnant de 0 à 37,3 m² par hectare (valeur médiane : 3,2 m² par hectare). Dans certains quadrats, tous les bouleaux présentaient des indices de dépérissement (Tableau VII). Il y avait par contre des sections (E, F et G) où les bouleaux présentaient peu de signes de dépérissement.

Tableau V. Statistiques descriptives (moyenne, écart-type, médiane, valeurs minimale et maximale) des densités de bouleaux (individus avec une taille de 20 cm et plus) calculées dans chaque section de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, Québec, Canada, ainsi que pour l'ensemble des 80 quadrats d'échantillonnage répartis également dans les huit sections.

Section	Densité des bouleaux (ind./ha)				
	Moyenne	Écart-type	Médiane	Min.	Max.
A	25 500	12 500	23 200	8 400	47 600
B	10 600	12 900	7 400	3 200	46 400
C	8 200	5 400	6 200	2 400	20 800
D	9 700	6 400	8 200	1 600	19 200
E	3 600	9 300	0	0	29 600
F	7 600	5 000	6 600	400	16 800
G	4 800	3 200	3 400	1 200	10 000
H	10 200	14 800	4 000	0	44 800
Toutes	10 000	11 100	6 600	0	47 600

Tableau VI. Statistiques descriptives (moyenne, écart-type, médiane, valeurs minimale et maximale) des surfaces terrières des bouleaux calculées dans chaque section de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, Québec, Canada, ainsi que pour l'ensemble des 80 quadrats d'échantillonnage répartis également dans les huit sections.

Section	Surface terrière totale (m ² /ha)				
	Moyenne	Écart-type	Médiane	Min.	Max.
A	10,1	5,1	8,6	4,9	19,1
B	9,9	4,8	9,6	2,7	18,5
C	8,9	10,7	5,3	1,8	37,3
D	5,0	4,2	3,3	0,6	12,5
E	0,3	0,6	0	0	1,8
F	3,1	2,2	2,6	<0,1	7,6
G	3,0	2,3	2,5	<0,1	7,1
H	1,9	1,9	1,7	0	5,9
Toutes	5,3	6,0	3,2	0	3,7

Tableau VII. Statistiques descriptives (moyenne, écart-type, médiane, valeurs minimale et maximale) de la proportion de bouleaux avec indices de dépérissement dans chaque section de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis ainsi que pour l'ensemble des 80 quadrats d'échantillonnage répartis également dans les huit sections.

Bouleaux avec indices de dépérissement (% des individus recensés)					
Section	Moyenne	Écart-type	Médiane	Min.	Max.
A	27	15	31	5	54
B	72	6	72	61	80
C	78	12	80	61	100
D	30	24	21	0	70
E	4	7	1	0	14
F	9	9	7	0	30
G	10	14	0	0	33
H	26	24	17	0	60
Toutes	34	30	25	0	100

3.1.2 Modèles prédictifs des facteurs favorisant l'envahissement par le bouleau

Les résultats de l'analyse de régression linéaire multiple (Tableau VIII) indiquent que la densité des bouleaux dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis est significativement influencée par le niveau de la nappe phréatique ainsi que par la durée d'abandon du site, mais non par l'épaisseur du dépôt tourbeux ou le contenu volumique en eau de la tourbe. Le niveau de la nappe phréatique est le facteur ayant le plus d'influence sur la densité des bouleaux : plus le niveau est bas (loin de la surface du sol), plus la densité des bouleaux est grande. Le modèle indique également que plus la durée d'abandon du site est longue, moins la densité des bouleaux est grande. L'ajustement des données au modèle est d'environ 18 % (R^2 ajusté = 0,183), ce qui n'est pas une valeur très élevée. Il importe toutefois de rappeler que l'objectif premier de ce travail n'est pas de prédire avec exactitude les densités de bouleaux mais bien d'identifier les facteurs influençant ces densités. Pour ce modèle, les deux variables indépendantes retenues sont significatives à un seuil de $\alpha = 0,01$. En d'autres mots, la probabilité d'accepter ces variables dans le modèle alors qu'elles ne seraient pas, en réalité, significatives est inférieure à 1 %.

Le deuxième modèle construit (Tableau VIII) indique que la surface terrière des bouleaux est influencée par le niveau de la nappe phréatique, mais non par la durée d'abandon du site, le contenu volumique en eau de la tourbe ou l'épaisseur du dépôt

tourbeux. En somme, plus le niveau de la nappe phréatique est bas (loin de la surface du sol), plus la surface terrière des bouleaux est grande. L'ajustement des données au modèle est d'environ 21 % (R^2 ajusté = 0,205) et la variable retenue est significative à un seuil de $\alpha = 0,001$.

Tableau VIII. Résultats de l'analyse de régression linéaire multiple pour les modèles de densité de bouleaux, de surface terrière totale de bouleaux et de la proportion de bouleaux avec indices de dépérissement (tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, Québec, Canada). Pour chacun des modèles, l'effet de quatre variables indépendantes a été testé, soit le niveau de la nappe phréatique (données du mois de juillet), la durée d'abandon du site, l'épaisseur du dépôt tourbeux et le contenu volumique en eau de la tourbe (données du mois de juillet). Les modèles n'incluent que les variables significatives.

Modèle	Variables indépendantes	Non standardisé		Standardisé		
		Coeff. b	Erreur-type	β	t	P
Variable dépendante: densité des bouleaux R^2 ajusté = 0,183	nappe phréatique	1,183	0,306	0,397	3,863	<0,001
	durée d'abandon	-3,855	1,405	-0,281	-2,730	0,008
Variable dépendante: surface terrière totale des bouleaux R^2 ajusté = 0,205	nappe phréatique	1,637	0,354	0,464	4,621	<0,001
Variable dépendante: proportion de bouleaux avec indices de dépérissement R^2 ajusté = 0,399	durée d'abandon	3,853	0,119	0,622	32,354	<0,001
	tourbe	0,250	0,021	0,239	12,084	<0,001
	nappe phréatique	0,344	0,032	0,196	10,817	<0,001

Enfin, le troisième modèle indique que le pourcentage de bouleaux avec indices de dépérissement est influencé par la durée d'abandon du site, l'épaisseur du dépôt tourbeux et le niveau de la nappe phréatique, mais non par le contenu volumique en eau de la tourbe (Tableau VIII). En d'autres termes, plus la durée d'abandon est longue, plus le dépôt tourbeux est épais et plus le niveau de nappe phréatique est bas (loin de la surface du sol), plus le pourcentage de bouleaux avec indices de dépérissement est élevé. L'ajustement des données au modèle est d'environ 40 % (R^2 ajusté = 0,399) et toutes les variables retenues sont significatives à un seuil de $\alpha = 0,001$.

Les données de nappe phréatique retenues pour ces trois modèles sont celles mesurées au milieu de l'été (juillet) puisque ce sont les conditions qui semblent le mieux saisir les contraintes à la croissance des bouleaux et qui présentent la plus grande variabilité.

3.2 Impact du bouleau sur l'évapotranspiration d'une tourbière

3.2.1 Taux d'évaporation et de transpiration

Au cours de l'été 2005, les températures enregistrées à Québec ont varié entre 5 et 32 °C (Tableau IX). Les plus basses températures ont bien sûr été enregistrées au début et à la toute fin de l'été. Les températures les plus élevées ont principalement été enregistrées au mois de juillet. Les précipitations totales reçues dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis durant les 72 heures que duraient chaque semaine les expériences d'évaporation et de transpiration ont varié entre 0 et 45 mm.

Le taux d'évaporation hebdomadaire moyen de la tourbe au cours de l'été 2005 a varié entre 1,65 et 5,26 mm par jour et le taux de transpiration hebdomadaire moyen du bouleau entre 0,29 et 2,89 mm par jour (Tableau IX). Les taux d'évaporation enregistrés au cours des trois semaines où il y eut très fortes précipitations (>20 mm) n'ont pas été calculés en raison de l'influence non négligeable (supérieure à 0,1 g) des nombreuses gouttes de pluie sur le poids des pots non scellés. Le test de comparaison des moyennes de Student indique que le taux d'évaporation de la tourbe nue est significativement plus élevé que le taux de transpiration du bouleau pour sept des neuf semaines où cette comparaison est possible. En moyenne, les taux d'évaporation ont été 2,47 fois plus élevés que les taux de transpiration. La différence de poids des pots témoins (avant – après expérience) était toujours inférieure à 0,9 g, indiquant que la méthode pour sceller les pots (donc pour empêcher les pertes d'eau par d'autres moyens que la transpiration) était efficace.

Tableau IX. Moyennes des taux d'évaporation de la tourbe et de transpiration du bouleau calculées chaque semaine (été 2005) dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, Québec, Canada, ainsi que le rapport entre ces deux taux. La quantité totale de précipitations reçues (dans la tourbière) ainsi que l'étendue des températures (valeurs minimale et maximale) mesurées durant l'expérience à la station météorologique de Québec sont aussi indiquées.

Période	Taux d'évaporation moyen (mm jour ⁻¹)	Taux de transpiration moyen (mm jour ⁻¹)	Rapport (évap./transp.)	Précipitations totales reçues (mm)	Étendue des températures (°C)
30 mai au 2 juin*	3,32	1,78	1,87	1,2	9-29
6 au 9 juin	n.d.	0,29	n.d.	22,8	7-23
13 au 16 juin	n.d.	0,32	n.d.	45,1	10-29
20 au 23 juin*	3,95	1,62	2,44	2,0	5-27
27 au 30 juin*	5,26	2,89	1,82	0	16-32
4 au 7 juillet	n.d.	1,18	n.d.	24,8	11-29
11 au 13 juillet*	4,76	2,27	2,10	0	16-31
18 au 21 juillet	3,10	1,37	2,80	5,0	14-30
25 au 28 juillet	1,65	1,11	1,49	7,2	10-28
1 ^{er} au 4 août*	4,56	1,30	3,51	2,6	12-29
8 au 11 août*	4,84	1,87	2,59	2,2	13-31
15 au 18 août*	3,59	0,99	3,63	2,8	6-29

*Différence significative ($P < 0,01$) entre les taux d'évaporation moyens et les taux de transpiration moyens.

n.d. : données non disponibles.

3.2.2 Surface foliaire totale

La surface foliaire moyenne (\pm écart-type) d'une feuille de bouleau dans la section A de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis était de $10,58 \pm 4,49 \text{ cm}^2$. Il existe une très forte relation ($R^2 = 0,97$) entre le diamètre du tronc d'un bouleau et sa surface foliaire (Figure 4). Cette relation permet d'estimer, avec l'aide de la structure du peuplement de bouleaux dans la section où l'expérience fut effectuée (Figure 5), la surface foliaire totale du site. Cette dernière serait de $48 \text{ } 100 \text{ m}^2$ par hectare, pour un indice de surface foliaire de 4,8.

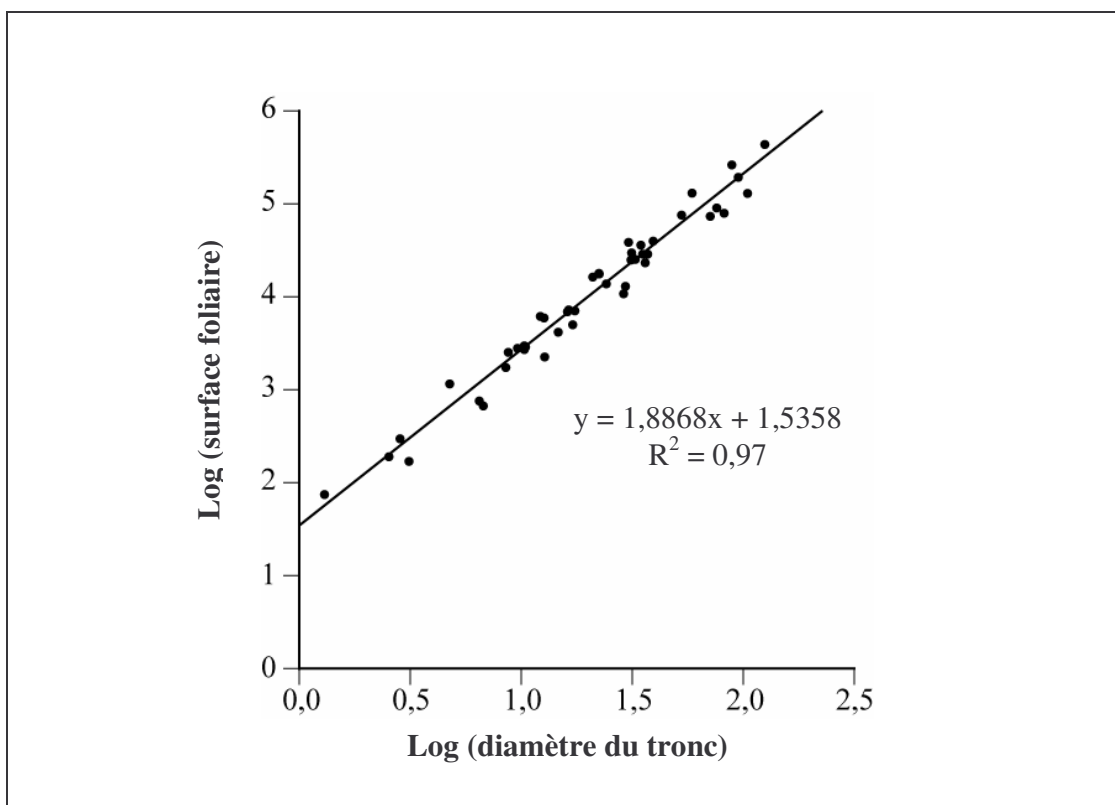


Figure 4. Relation entre la surface foliaire moyenne d'un bouleau (cm^2) et le diamètre de son tronc (mm). Ces données ont été prises dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, Québec, Canada.

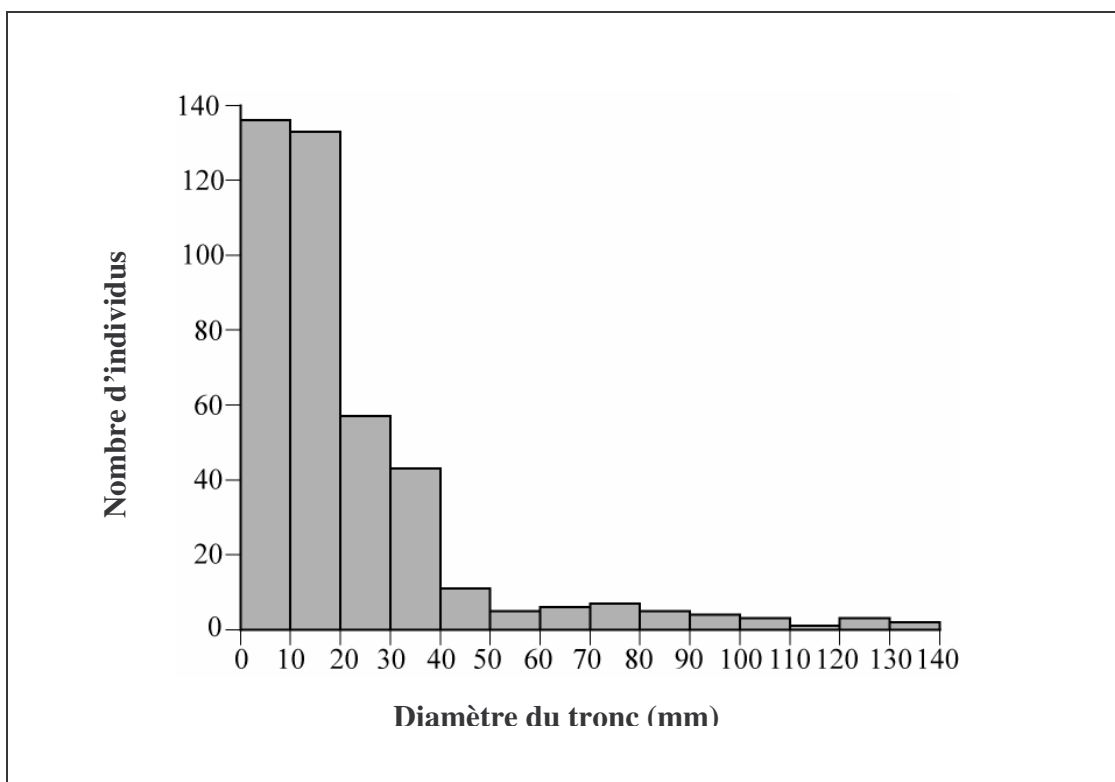


Figure 5. Structure du peuplement de bouleaux (diamètre des troncs, classes de 10 mm) du champ d'aspiration où l'expérience sur la mesure du taux de transpiration du bouleau a pris place dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, Québec, Canada. Au total, le diamètre du tronc de 416 bouleaux a été mesuré.

3.2.3 Quantité d'eau perdue par transpiration du bouleau

La quantité d'eau perdue par le bouleau par transpiration dans le site d'étude au cours des 35 jours de mesures a été estimée à 2 342 000 litres par hectare (234,2 mm), ce qui est plus de deux fois la quantité d'eau reçue par précipitation pendant la même période (1 157 000 litres par hectare; 115,7 mm). En interpolant les résultats des 35 jours de mesures à l'ensemble de la période estivale (soit du 30 mai au 22 août), la quantité totale d'eau perdue par transpiration au cours de l'été 2005 voisinerait 5 700 000 litres par hectare, ce qui est environ 3 fois le volume d'eau contenu dans une piscine olympique. De plus, même si les taux d'évaporation de la tourbe sont en moyenne 2,47 fois plus élevé que les taux de transpiration du bouleau, il y a environ deux fois plus d'eau perdue par transpiration par unité de surface foliaire du bouleau qu'il y en aurait par évaporation si le site n'avait pas été envahi (tourbe nue) puisque la surface foliaire totale des bouleaux du site d'étude est environ cinq fois plus élevée que la surface du sol.

4.0 Discussion

4.1 Dynamique de l'envahissement du bouleau

Dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, le niveau de la nappe phréatique est le facteur qui influence le plus la densité des bouleaux qui s'installent dans les champs de tourbe abandonnés. Plus un site est sec, plus les bouleaux y croissent en abondance. À l'opposé, on observe très peu de bouleaux dans les sites très humides où le niveau de la nappe phréatique est près de la surface. L'influence du niveau de la nappe phréatique se fait aussi sentir sur la surface terrière totale des bouleaux. En effet, plus le niveau de la nappe phréatique est bas, plus la surface terrière totale des bouleaux est grande. Ces résultats ne sont guère surprenants : même si les bouleaux tolèrent des niveaux élevés de nappe phréatique (Bergeron *et al.*, 1988), il n'en demeure pas moins qu'ils poussent beaucoup mieux sur substrat sec (Safford *et al.*, 1990), donc là où le sol est davantage oxygéné. Si le niveau de la nappe phréatique influence fortement les densités de bouleaux et leur surface terrière, il n'en va pas de même pour l'épaisseur du dépôt tourbeux résiduel. Un mince dépôt tourbeux ne semble pas favoriser davantage l'établissement des bouleaux, du moins dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis.

Plusieurs indices suggèrent que l'envahissement de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis par le bouleau ne serait qu'un phénomène temporaire (quelques décennies). On trouve en effet moins de bouleaux sur les sites abandonnés depuis longtemps. De plus, le pourcentage de bouleaux présentant des signes de dépérissement est plus élevé dans les sites où la durée d'abandon est plus longue. En somme, les peuplements de bouleaux deviendraient de moins en moins denses et de plus en plus dépéris avec l'âge. Les bouleaux n'ayant pas une grande longévité, soit moins de 140 ans (Safford *et al.*, 1990), il n'est pas anormal de constater que des sites plus âgés contiennent moins de bouleaux. Cela dit, le phénomène d'éclaircissement et de dépérissement des peuplements de bouleaux semble particulièrement hâtif dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis. Par exemple, on trouve des pourcentages de bouleau avec indices de dépérissement très élevés (72–78 %) dans des sites abandonnés depuis à peine 20–23 ans. Il semble donc que certaines caractéristiques de la tourbière, favorables aux bouleaux au cours des premières années suivant l'abandon des champs de tourbe, changent par la suite de

manière telle que les bouleaux ne puissent plus se maintenir sur les sites avec autant de vigueur.

Quelles sont les caractéristiques qui changent au fil des ans dans un champ de tourbe à l'abandon ? On trouve souvent une quantité significativement plus élevée de nutriments près de la surface du sol dans un champ de tourbe abandonné que dans une tourbière ombrotrophe non perturbée. Cette plus grande quantité de nutriments (azote, calcium, chlorite, magnésium, potassium, sodium, sulfate) s'expliquerait par la décomposition en surface d'une couche tourbeuse minérotrophe plus riche en éléments nutritifs (Wind-Mulder *et al.*, 1996; Wind-Mulder & Vitt, 2000). En effet, lorsqu'un site est exploité, la majeure partie du dépôt tourbeux est prélevée, exposant ainsi la tourbe formée lors des premières étapes du développement de la tourbière, soit l'étape minérotrophe dans le cas de la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis. De plus, la surface du sol d'un milieu humide drainé s'oxyde souvent davantage, ce qui favorise la libération d'azote (Venterink *et al.*, 2002). Cette plus grande quantité de nutriments pourrait être un des facteurs influençant fortement la colonisation d'un champ de tourbe à l'abandon par les plantes (Salonen, 1994). À cet égard, on peut émettre l'hypothèse que ces nutriments favorisent des espèces opportunistes comme les bouleaux lors de leur installation, ou du moins accélèrent leur croissance et les maintiennent en bon état de santé au cours des premières années de leur existence. Cela dit, cette source d'éléments nutritifs s'épuiserait rapidement lorsqu'elle est absorbée par la végétation, comme par exemple par une multitude de petits bouleaux en croissance (Wind-Mulder *et al.*, 1996; Wind-Mulder & Vitt, 2000; Bussièrès, 2005). Faute d'un apport additionnel en éléments nutritifs, la survie des bouleaux deviendrait compromise à plus ou moins brève échéance (Limpens *et al.*, 2003).

Un élément à l'appui de cette hypothèse est que dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, il existe une relation significative entre l'épaisseur du dépôt tourbeux et le pourcentage de bouleaux présentant des signes de dépérissement. Plus le dépôt de tourbe est épais, plus les bouleaux ont des signes de dépérissement. Or, plus le dépôt de tourbe est épais, moins les racines des bouleaux ont accès aux ressources nutritives du sol minéral sous-jacent, ce qui peut donc contribuer à accélérer leur dépérissement.

Enfin, le niveau de la nappe phréatique pourrait aussi contribuer d'une certaine manière au dépérissement du bouleau. Dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis, il existe une relation significative entre le niveau de la nappe phréatique et le pourcentage de bouleaux présentant des signes de dépérissement. Plus le niveau de la nappe est bas, plus les bouleaux sont dépéris. À prime abord, ce résultat est étrange puisque les bouleaux préfèrent les sites secs pour leur établissement. Cela dit, il ne faut pas oublier que les bouleaux peuvent aussi souffrir de la sécheresse. Leurs réseaux de racines sont très superficiels, ne dépassant guère 60 cm sous la surface du sol (Safford *et al.*, 1990). Une baisse trop importante du niveau de la nappe phréatique pourrait donc nuire à la survie de ces arbres. Comme les bouleaux soutirent beaucoup d'eau du sol, ils peuvent même à la limite contribuer à abaisser la nappe phréatique qui les alimente en eau, et donc à accélérer leur propre dépérissement. Par exemple, j'ai estimé dans ce mémoire que pour un site abandonné depuis 10 ans et fortement envahi par le bouleau (surface foliaire totale de 48 000 m² par hectare), les pertes d'eau par transpiration pour la saison estivale sont de plus de 5 700 000 litres par hectare, une valeur deux fois plus élevée que la quantité d'eau qui aurait été perdue par évaporation si le site n'avait pas été envahi (tourbe nue). Dans ce même site, les pertes d'eau par transpiration du bouleau étaient, au cours de l'été 2005, environ deux fois plus élevées que la quantité d'eau reçue par précipitation, principal apport en eau des tourbières ombrotrophes. En somme, les résultats de cette étude indiquent que la quantité d'eau perdue par les bouleaux n'est pas négligeable, malgré les affirmations contraires de certains chercheurs (Diamond *et al.*, 2003). Cependant, pour le moment, il est difficile d'estimer dans ce cas-ci à quel point ces pertes d'eau par transpiration ont un impact sur le niveau de la nappe phréatique.

Toutes les informations mentionnées ci-haut peuvent être utilisées pour proposer un modèle hypothétique décrivant le processus d'envahissement d'une tourbière exploitée à l'abandon par le bouleau (Figure 6). Lorsque qu'un site est abandonné, le niveau de la nappe phréatique est plutôt bas, ce qui est généralement le cas pour les sites où les canaux de drainage sont toujours fonctionnels. De plus, il existe habituellement une quantité plus élevée que d'ordinaire de nutriments près de la surface du sol. Ces caractéristiques favorisent l'établissement rapide d'un grand nombre de bouleaux, du moins là où les arbres semenciers ne sont pas situés à des distances trop considérables. Au début du

processus d'envahissement, les pertes d'eau par transpiration des bouleaux sont relativement faibles puisque la surface foliaire totale des individus est encore très petite. Environ cinq ans après l'abandon du site, les bouleaux devenus plus gros perdent de plus en plus d'eau par transpiration, ce qui entraîne progressivement une baisse du niveau de la nappe phréatique. Il faut d'ailleurs savoir que dans une tourbière ombrotrophe, le niveau de la nappe phréatique est particulièrement sensible aux pertes d'eau par évapotranspiration; la majeure partie des pertes s'expliqueraient de cette manière (Heikurainen, 1963; Ingram, 1983; Schouwenaars, 1993; Heathwaite, 1995; Price, 1996; Van Seters & Price, 2001). Dix ans après l'abandon du site, les bouleaux sont très grands et volumineux, ont une grande surface foliaire et perdent donc de très grandes quantités d'eau par transpiration, ce qui abaisse encore davantage le niveau de la nappe phréatique.

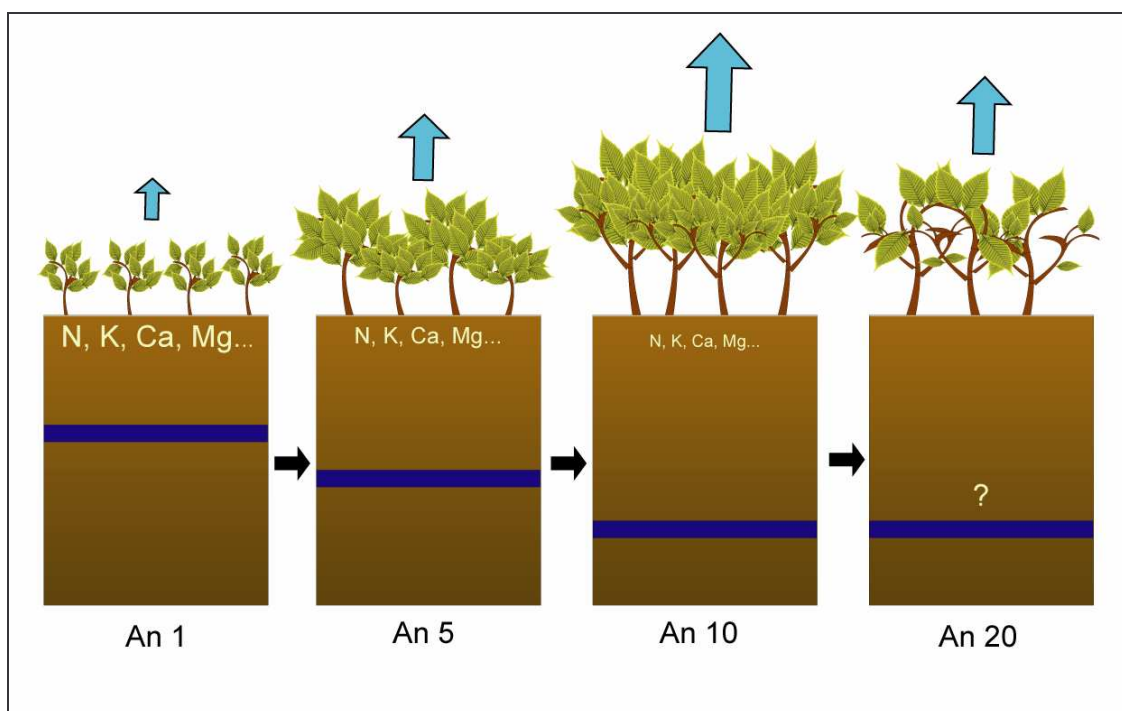


Figure 6. Schéma hypothétique représentant la dynamique de l'envahissement d'un champ de tourbe par le bouleau. Les flèches bleues indiquent l'importance des pertes d'eau par transpiration et les lignes bleues le niveau de la nappe phréatique. L'épuisement des sources d'éléments nutritifs est illustré par des caractères (illustrant les éléments) de moins en moins gros. La durée d'abandon (en années) est aussi indiquée.

Lorsqu'une bonne partie des éléments minéraux présents à la surface du sol sont épuisés et que le niveau de la nappe phréatique est particulièrement bas (plus de 10 ans

après abandon), les bouleaux commencent à présenter certains signes de dépérissement, qui se manifestent, entre autre, par la présence de nombreuses tiges et branches mortes (Kozlowski & Pallardy, 1997). Les bouleaux deviennent de moins en moins feuillus, ce qui contribue à diminuer les pertes d'eau par transpiration. Il est impossible de savoir, pour le moment, si cette diminution des pertes engendre une remontée du niveau de la nappe phréatique. En effet, le plus vieux champ de tourbe à l'abandon dans la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis n'était âgé que de 23 ans, ce qui n'est pas assez vieux pour permettre de poser un pronostic en la matière. Quoiqu'il en soit, il se peut que le niveau augmente, mais il est aussi possible que le niveau de la nappe phréatique reste bas pendant une période prolongée puisque les grandes quantités d'eau perdues par transpiration au cours des années de croissance du bouleau ne seront pas nécessairement renouvelées rapidement.

4.2 Gestion du bouleau envahisseur

Certaines espèces végétales, lorsqu'elles envahissent un site, peuvent en altérer les conditions chimiques ou physiques de manière prolongée, ce qui peut avoir pour effet de rendre la restauration du site beaucoup plus difficile (D'Antonio & Meyerson, 2002). Ainsi, l'envahissement d'une tourbière par le bouleau pourrait avoir un impact sur l'hydrologie du site, puisque cette invasion augmente de manière significative les pertes d'eau par transpiration, même si le phénomène ne semble perdurer que sur une période de temps relativement courte (quelques décennies). De grandes pertes d'eau par transpiration entraînent l'assèchement du sol en surface; ce phénomène devient critique lorsque la nappe phréatique se trouve à plus de 50 cm de la surface du sol puisqu'elle n'arrive plus alors à regarnir en eau la tourbe de surface (Price *et al.*, 2003). L'assèchement du sol en surface va aussi favoriser la compression du dépôt tourbeux et augmenter la tension hydrique du sol (Schouwenaars, 1993; Price & Schlotzhauer, 1999). Lorsque la tension hydrique du sol devient trop grande en surface, les sphaignes, des végétaux sans système racinaire, ne peuvent soutirer du sol l'eau dont elles ont besoin, ce qui risque d'entraîner leur dessèchement et même leur mort (Schouwenaars, 1993; Price, 1996, 1997; LaRose *et al.*, 1997; Price & Schlotzhauer, 1999; Price *et al.*, 2003). Puisque les sphaignes sont des végétaux-clés dans le processus de restauration des tourbières

(Rochefort, 2001), il semble donc préférable d'empêcher le bouleau d'envahir les sites abandonnés si on veut en favoriser la régénération.

Comme les résultats de cette étude indiquent que le bouleau n'envahit pas les sites très humides, un simple blocage des canaux de drainage, qui élèverait le niveau de la nappe phréatique à environ 20 cm de la surface du sol pendant la saison estivale, serait une mesure probablement suffisante pour empêcher l'envahissement massif d'un site par le bouleau. En effet, un haut niveau de nappe phréatique a pour effet de perturber la respiration des racines des plantes vasculaires peu adaptées aux sols humides, ce qui peut empêcher leur établissement ou entraîner leur mort (Black, 1957; Salonen, 1990), particulièrement dans le cas du bouleau (Meade, 1992). De surcroît, il semblerait que les sphaignes soient particulièrement compétitives par rapport au bouleau dans les sites où il y a peu d'azote, mais où l'eau abonde (Limpens *et al.*, 2003; Tomassen *et al.*, 2004).

Élever le niveau de la nappe phréatique peut empêcher le bouleau de s'installer, mais cette mesure peut aussi favoriser l'envahissement d'un site par d'autres espèces végétales. Par exemple, une nappe phréatique à moins de 30 à 40 cm sous la surface du sol pourrait favoriser l'invasion d'une tourbière abandonnée par la linaigrette (*Eriophorum vaginatum*; Tuitilla *et al.*, 2000; Lavoie *et al.*, 2005a), alors qu'une nappe phréatique très près ou au-dessus de la surface pourrait plutôt favoriser l'invasion par le jonc (*Juncus* spp.; Meade, 1992). C'est d'ailleurs précisément ce que l'on observe à la tourbière de Saint-Henri-de-Lévis. Les chercheurs sont divisés quant à l'impact des invasions de linaigrette dans les tourbières, mais les travaux les plus récents (Lavoie *et al.*, 2005a) montrent que cette espèce ne contribuerait pas à faciliter le retour des espèces typiques de tourbières. Elle produirait aussi, dans les champs de tourbe à l'abandon, de grandes quantités de méthane (Marinier *et al.*, 2004). Quant aux impacts des invasions de joncs dans les tourbières, peu d'études portent sur ce sujet. Cependant, il semblerait que la litière des joncs crée des conditions favorables à l'établissement et à la croissance des mousses typiques des tourbières et que la sphaigne arrive à s'établir dans des colonies de joncs inondées (Meade, 1992). Cette hypothèse reste néanmoins à démontrer.

Quoiqu'il en soit, l'augmentation du niveau de la nappe phréatique demeure le meilleur choix lorsqu'il s'agit de créer des conditions favorables au retour des espèces

typiques des tourbières, même si cette mesure peut, dans certains cas, favoriser l'invasion d'espèces plus ou moins désirables. Cela dit, cette mesure ne peut, à elle seule, permettre la restauration complète d'un champ de tourbe à l'abandon (Rochefort *et al.*, 2003). Il importe aussi de réintroduire du matériel végétal et de le protéger contre le dessèchement pour obtenir, rapidement, un couvert végétal dominé par les sphaignes. Dans les sections abandonnées où la restauration ne peut se faire immédiatement, mais où elle est prévue dans une vision de cinq à huit ans, il serait préférable de herser annuellement les champs de tourbe à l'abandon pour empêcher les invasions d'arbres et leur impacts négatifs, et pour faciliter le retour des sphaignes. Ces dernières sauront bien, alors, comment lutter contre le bouleau envahisseur.

5.0 Bibliographie

- Beguín, H. (1979) *Méthodes d'analyse géographique quantitative*. Librairies techniques, Paris.
- Bergeron, Y., Bouchard, A. & Leduc, A. (1988) Les successions secondaires dans les forêts du Haut-Saint-Laurent, Québec. *Naturaliste canadien*, **115**, 19-38.
- Bérubé, M.-È. & Lavoie, C. (2000) The natural revegetation of a vacuum-mined peatland: eight years of monitoring. *Canadian Field-Naturalist*, **114**, 279-286.
- Binggeli, P. (1996) A taxonomic, biogeographical and ecological overview of invasive woody plants. *Journal of Vegetation Science*, **7**, 121-124.
- Black, C.A. (1957) *Soil-plant relationships*. Wiley, New York.
- Braithwaite, R.W., Lonsdale, W.M. & Estbergs, J.A. (1989) Alien vegetation and native biota in tropical Australia: the impact of *Mimosa pigra*. *Biological Conservation*, **48**, 189-210.
- Brinson, M.M. & Malvárez, A.I. (2002) Temperate freshwater wetlands: types, status, and threats. *Environmental Conservation*, **29**, 115-133.
- Bruce, K.A., Cameron, G.N., Harcombe, P.A. & Jubinsky, G. (1997) Introduction, impact on native habitats, and management of a woody invader, the Chinese tallow tree, *Sapium sebiferum* (L.) Roxb. *Natural Areas Journal*, **17**, 255-260.
- Bussièrès, J. (2005) *Potentiel d'établissement d'essences forestières et fruitières en tourbières résiduelles*. Mémoire M.Sc., Université Laval, Québec.
- Campbell, D.R., Rochefort, L. & Lavoie, C. (2003) Determining the immigration potential of plants colonizing disturbed environments: the case of milled peatlands in Quebec. *Journal of Applied Ecology*, **40**, 78-91.
- D'Antonio, C. & Meyerson, L.A. (2002) Exotic plant species as problems and solutions in ecological restoration: a synthesis. *Restoration Ecology*, **10**, 703-713.
- Devitt, D.A., Sala, A., Mace, K.A. & Smith, S.D. (1997) The effect of applied water on the water use of saltcedar in a desert riparian environment. *Journal of Hydrology*, **192**, 233-246.
- Diamond, J., Browning, M., Williams, A. & Middleton, J. (2003) Lack of evidence for impact of the European White Birch, *Betula pendula*, on the hydrology of Wainfleet Bog, Ontario. *Canadian Field-Naturalist*, **117**, 393-398.
- Dye, P. & Jarman, C. (2004) Water use by black wattle (*Acacia mearnsii*): implications for the link between removal of invading trees and catchment streamflow response. *South African Journal of Science*, **100**, 40-44.

- Dye, P., Moses, G., Vilakazi, P., Ndlela, R. & Royappen, M. (2001) Comparative water use of wattle thickets and indigenous plant communities at riparian sites in the Western Cape and KwaZulu-Natal. *Water South Africa*, **27**, 529-538.
- Environnement Canada (2005) Normales et moyennes climatiques au Canada 1971-2000. http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/index_f.html. Consulté le 28 mars 2006.
- Farrar, J.L. (1996) *Les arbres du Canada*. Fides, Saint Laurent, et Services canadien des forêts, Ressources naturelles Canada, Ottawa.
- Fralish, J.S. & Franklin, S.B. (2002) *Taxonomy and ecology of woody plants in North American forests (excluding Mexico and subtropical Florida)*. Wiley, New York.
- Furlow, J.J. (1997). Betulaceae Gray. Birch family. Dans *Flora of North America, North of Mexico*. Volume 3. Oxford University Press, New York, p. 507-539.
- García-Robledo, C.A. & Murcia, C. (2005) Comparative habitat susceptibility to invasion by Chinese ash (*Fraxinus chinensis*: Oleaceae) in a tropical Andean landscape. *Biological Invasions*, **7**, 405-415.
- Girard, M., Lavoie, C. & Thériault, M. (2002) The regeneration of a highly disturbed ecosystem: a mined peatland in southern Québec. *Ecosystems*, **5**, 274-288.
- Gordon, D.R. (1998) Effects of invasive, non-indigenous plant species on ecosystem processes: lessons from Florida. *Ecological Applications*, **8**, 975-989.
- Görgens, A.H.M. & van Wilgen, B.W. (2004) Invasive alien plants and water resources in South Africa: current understanding, predictive ability and research challenges. *South African Journal of Science*, **100**, 27-33.
- Hair, J.F.Jr., Anderson, R.E. & Tatham, R.L. (1987) *Multivariate data analysis with readings*. Deuxième édition. Macmillan, New York.
- Heathwaite, L. (1995). Problems in the hydrological management of cut-over raised mires, with special reference to Thorne Moors, South Yorkshire. Dans *Restoration of temperate wetlands* (rédacteurs: B.D. Wheeler, S.C. Shaw, W.J. Fojt & R.A. Robertson), Wiley, Chichester, p. 315-329.
- Heikurainen, L. (1964) On using ground water table fluctuations for measuring evapotranspiration. *Acta Forestalia Fennica*, **76**, 2-16.
- Hughes, R.F. & Denslow, J.S. (2005) Invasion by a N₂-fixing tree alters function and structure in wet lowland forests of Hawaii. *Ecological Applications*, **15**, 1615-1628.
- Ingram, H.A.P. (1983). Hydrology. Dans *Ecosystems of the world 4A. Mires: swamp, bog, fen and moor. General studies* (rédacteur: A.J.P. Gore), Elsevier, Amsterdam, p. 67-158.

- Jean, M. & Bouchard, A. (1991) Temporal changes in wetland landscapes of a section of the St. Lawrence River, Canada. *Environmental Management*, **15**, 241-250.
- Jonsson-Ninniss, S. & Middleton, J. (1991) Effect of peat extraction on the vegetation in Wainfleet Bog, Ontario. *Canadian Field-Naturalist*, **105**, 505-511.
- Katz, G.L. & Shafroth, P.B. (2003) Biology, ecology and management of *Elaeagnus angustifolia* L. (Russian olive) in western North America. *Wetlands*, **23**, 763-777.
- Kozlowski, T.T. & Pallardy, S.G. (1997) *Physiology of woody plants*. Deuxième édition. Academic Press, San Diego.
- LaRose, S., Price, J. & Rochefort, L. (1997) Rewetting of a cutover peatland: hydrologic assessment. *Wetlands*, **17**, 416-423.
- Lavoie, C., Marcoux, K., Saint-Louis, A. & Price, J.S. (2005a) The dynamics of a cotton-grass (*Eriophorum vaginatum* L.) cover expansion in a vacuum-mined peatland, southern Québec, Canada. *Wetlands*, **25**, 64-75.
- Lavoie, C. & Rochefort, L. (1996) The natural revegetation of a harvested peatland in southern Québec: a spatial and dendroecological analysis. *Écoscience*, **3**, 101-111.
- Lavoie, C. & Saint-Louis, A. (1999) The spread of gray birch (*Betula populifolia*) in eastern Quebec: landscape and historical considerations. *Canadian Journal of Botany*, **77**, 859-868.
- Lavoie, C., Saint-Louis, A. & Lachance, D. (2005b) Vegetation dynamics on an abandoned vacuum-mined peatland: 5 years of monitoring. *Wetlands Ecology and Management*, **13**, 621-633.
- LeMaitre, D.C., van Wilgen, B.W., Chapman, R.A. & McKelly, D.H. (1996) Invasive plants and water resources in the Western Cape Province, South Africa: modelling the consequences of a lack of management. *Journal of Applied Ecology*, **33**, 161-172.
- Le Maitre, D.C., van Wilgen, B.W., Gelderblom, C.M., Bailey, C., Chapman, R.A. & Nel, J.A. (2002) Invasive alien trees and water resources in South Africa: case studies of the costs and benefits of management. *Forest Ecology and Management*, **160**, 143-159.
- Le Maitre, D.C., Versfeld, D.B. & Chapman, R.A. (2000) The impact of invading alien plants on surface water resources in South Africa: a preliminary assessment. *Water South Africa*, **26**, 397-408.
- Limpens, J., Berendse, F. & Klees, H. (2003) N deposition affects N availability in interstitial water, growth of *Sphagnum* and invasion of vascular plants in bog vegetation. *New Phytologist*, **157**, 339-347.
- Lugo, A.E. (2004) The outcome of alien tree invasions in Puerto Rico. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **2**, 265-273.

- Mack, M.C. & D'Antonio, C.M. (1998) Impacts of biological invasions on disturbance regimes. *Trends in Ecology & Evolution*, **13**, 195-198.
- Manning, P., Putwain, P.D. & Webb, N.R. (2004) Identifying and modelling the determinants of woody plant invasion of lowland heath. *Journal of Ecology*, **92**, 868-881.
- Marcoux, K. (2000) *Les invasions de linaigrette (Eriophorum vaginatum L.): aide ou frein à la restauration des tourbières?* Mémoire M.Sc., Université Laval, Québec.
- Marinier, M., Glatzel, S. & Moore, T.R. (2004) The role of cotton-grass (*Eriophorum vaginatum*) in the exchange of CO₂ and CH₄ at two restored peatlands, eastern Canada. *Écoscience*, **11**, 141-149.
- Meade, R. (1992) Some early changes following the rewetting of a vegetated cutover peatland surface at Danes Moss, Cheshire, UK, and their relevance to conservation management. *Biological Conservation*, **61**, 31-40.
- Mitsch, W.J. & Gosselink, J.G. (2000) *Wetlands*. Troisième édition. Wiley, New York.
- Moore, P.D. (2002) The future of cool temperate bogs. *Environmental Conservation*, **29**, 3-20.
- Moran, V.C., Hoffmann, J.H., & Zimmermann, H.G. (2005) Biological control of invasive alien plants in South Africa: necessity, circumspection, and success. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **3**, 71-77.
- Petit, R.J., Bialozyt, R., Garnier-Géré, P. & Hampe, A. (2004) Ecology and genetics of tree invasions: from recent introductions to Quaternary migrations. *Forest Ecology and Management*, **197**, 117-137.
- Price, J.S. (1996) Hydrology and microclimate of a partly restored cutover bog, Québec. *Hydrological Processes*, **10**, 1263-1272.
- Price, J.S. (1997) Soil moisture, water tension, and water table relationships in a managed cutover bog. *Journal of Hydrology*, **202**, 21-32.
- Price, J.S. (2001). L'hydrologie. Dans *Écologie des tourbières du Québec-Labrador* (éditeurs: S. Payette & L. Rochefort), Presses de l'Université Laval, Saint-Nicolas, p. 141-158.
- Price, J.S., Heathwaite, A.L. & Baird, A.J. (2003) Hydrological processes in abandoned and restored peatlands: an overview of management approaches. *Wetlands Ecology and Management*, **11**, 65-83.
- Price, J.S. & Schlotzhauer, S.M. (1999) Importance of shrinkage and compression in determining water storage changes in peat: the case of a mined peatland. *Hydrological Processes*, **13**, 2591-2601.

- Richardson, D.M. (1998) Forestry trees as invasive aliens. *Conservation Biology*, **12**, 18-26.
- Richardson, D.M., Williams, P.A. & Hobbs, R.J. (1994) Pine invasions in the Southern Hemisphere: determinants of spread and invadability. *Journal of Biogeography*, **21**, 511-527.
- Robinson, A.H. (1956) The necessity of weighting values in correlation analysis of areal data. *Annals of the Association of American Geographers*, **46**, 233-236.
- Rocheffort, L. (2001). Restauration écologique. Dans *Écologie des tourbières du Québec-Labrador* (rédacteurs: S. Payette & L. Rocheffort). Presses de l'Université Laval, Saint-Nicolas, p. 449-504.
- Rocheffort, L., Quinty, F., Campeau, S., Johnson, K. & Malterer, T. (2003) North American approach to the restoration of *Sphagnum* dominated peatlands. *Wetlands Ecology and Management*, **11**, 3-20.
- Safford, L.O., Bjorkbom, J.C. & Zasada, J.C. (1990). *Betula papyrifera* Marsh. Dans *Sylvics of North America* (rédacteurs: R.M. Burns & B.H. Honkala), Volume 2, United States Department of Agriculture, Forest Service, Washington, p. 158-171.
- Salonen, V. (1987) Relationship between the seed rain and the establishment of vegetation in two areas abandoned after peat harvesting. *Holarctic Ecology*, **10**, 171-174.
- Salonen, V. (1990) Early plant succession in two abandoned cut-over peatland areas. *Holarctic Ecology*, **13**, 217-223.
- Salonen, V. (1994) Revegetation of harvested peat surfaces in relation to substrate quality. *Journal of Vegetation Science*, **5**, 403-408.
- Schouwenaars, J.M. (1993) Hydrological differences between bogs and bog-relicts and consequences for bog restoration. *Hydrobiologia*, **265**, 217-224.
- Serbesoff-King, K. (2003) *Melaleuca* in Florida: a literature review on the taxonomy, distribution, biology, ecology, economic importance and control measures. *Journal of Aquatic Plant Management*, **41**, 98-112.
- Shafroth, P.B., Cleverly, J.R., Dudley, T.L., Taylor, J.P., Van Riper III, C., Weeks, E.P. & Stuart, J.N. (2005) Control of *Tamarix* in the western United States: implications for water salvage, wildlife use, and riparian restoration. *Environmental Management*, **35**, 231-246.
- SPSS (2003) *SPSS version 12.0*. SPSS, Chicago.
- Tomassen, H.B.M., Smolders, A.J.P., Limpens, J., Lamers, L.P.M. & Roelofs, J.G.M. (2004) Expansion of invasive species on ombrotrophic bogs: desiccation or high N deposition? *Journal of Applied Ecology*, **41**, 139-150.

- Tuittila, E.S., Rita, H., Vasander, H. & Laine, J. (2000) Vegetation patterns around *Eriophorum vaginatum* L. tussocks in a cut-away peatland in southern Finland. *Canadian Journal of Botany*, **78**, 47-58.
- Turner, C.E., Center, T.D., Burrows, D.W. & Buckingham, G.R. (1998) Ecology and management of *Melaleuca quinquenervia*, an invader of wetlands in Florida, U.S.A. *Wetlands Ecology and Management*, **5**, 165-178.
- Van Seters, T.E. & Price, J.S. (2001) The impact of peat harvesting and natural regeneration on the water balance of an abandoned cutover bog, Quebec. *Hydrological Processes*, **15**, 233-248.
- van Wilgen, B.W. & Richardson, D.M. (1985) The effects of alien shrub invasions on vegetation structure and fire behaviour in South African fynbos shrublands: a simulation study. *Journal of Applied Ecology*, **22**, 955-966.
- Venterink, H.O., Davidsson, T.E., Kiehl, K. & Leonardson, L. (2002) Impact of drying and re-wetting on N, P and K dynamics in a wetland soil. *Plant and Soil*, **243**, 119-130.
- Vitousek, P.M. & Walker, L.R. (1989) Biological invasion by *Myrica faya* in Hawai'i: plant demography, nitrogen fixation, ecosystem effects. *Ecological Monographs*, **59**, 247-265.
- Walters, M.B., Kruger, E.L. & Reich, P.B. (1993) Growth, biomass distribution and CO₂ exchange of northern hardwood seedlings in high and low light: relationships with successional status and shade tolerance. *Oecologia*, **94**, 7-16.
- Wind-Mulder, H.L., Rochefort, L. & Vitt, D.H. (1996) Water and peat chemistry comparisons of natural and post-harvested peatlands across Canada and their relevance to peatland restoration. *Ecological Engineering*, **7**, 161-181.
- Wind-Mulder, H.L. & Vitt, D.H. (2000) Comparisons of water and peat chemistries of a post-harvested and undisturbed peatland with relevance to restoration. *Wetlands*, **20**, 616-628.
- Zar, J.H. (1999) *Biostatistical analysis*. Quatrième édition. Prentice-Hall, Upper Saddle River.
- Zavaleta, E. (2000) The economic value of controlling an invasive shrub. *Ambio*, **29**, 462-467.
- Zedler, J.B. & Kercher, S. (2005) Wetland resources: status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annual Reviews of Environment and Resources*, **30**, 39-74.