

Université du Québec
Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE)

**EFFETS D'UN CHANGEMENT DE RÉGIME NIVÉOÉOLIEN
SUR UNE FORÊT INSULAIRE DU RÉSERVOIR ROBERT-BOURASSA,
QUÉBEC NORDIQUE**

Par
Philippe Boulanger

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc) en Sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Président du jury
et examinateur interne

Karem Chokmani
INRS-ETE

Examineur externe

Dominique Arsenault
Département de Biologie
Université du Québec à Rimouski

Directeur de recherche

Yves Bégin
INRS-ETE

Résumé

L'impact de la mise en eau du réservoir Robert-Bourassa en 1979 sur l'écologie riveraine des milieux insulaires a été étudié à l'île aux Neiges. La création d'une vaste étendue d'eau a transformé d'anciens sommets de colline en îles et a modifié la dynamique nivéoéolienne locale. En hiver, le réservoir gelé capte la neige qui est ensuite prise en charge par le vent. Celui-ci profite de larges espaces dégagés pour transporter les cristaux en suspension jusqu'aux pieds des premiers obstacles qu'il rencontre, i.e. les forêts riveraines.

Un transect d'échantillonnage a été tracé sur la rive sud-ouest de l'île aux Neiges. Une section transversale a été récoltée à la base de chacune des 415 épinettes ayant une hauteur supérieure à 1 m afin d'en dénombrer les cernes diagnostiques. Les dommages mécaniques ont également été récoltés sur 83 épinettes. Une épinette a été sélectionnée à chaque mètre à partir du début du transect pour en mesurer la croissance radiale. Les résultats ont été comparés à ceux obtenus sur d'autres îles.

L'histoire du peuplement forestier de l'île aux Neiges a pu être divisée en trois périodes. Entre 1850 et 1920, la forêt a repeuplé le sommet de colline suite au passage d'un incendie forestier. Sur le flanc sud-ouest, la croissance a été ralentie par un sol peu épais et des dépressions dans le socle rocheux qui empêchaient l'évacuation de l'eau. Entre 1920 et 1980, la croissance des arbres sur l'ensemble de la colline a chuté sous la moyenne régionale. L'entourbement graduel du sommet pourrait en avoir été la cause. Suite à la mise en eau en 1979, une baisse de croissance marquée est survenue chez tous les peuplements insulaires étudiés. À l'île aux Neiges, l'ouverture du paysage suite à la mort de 14,5% des arbres en 30 ans a engendré une détente de croissance à partir de 1982. Les arbres ont enregistré un grand nombre de cernes diagnostiques et plusieurs d'entre eux ont subi des bris ou des ploiments d'organes. Les chionoturbations ont créé plusieurs formes de croissance exprimant un gradient d'exposition nivéoéolienne. Ces phénomènes sont similaires à ceux des îles des grands lacs nordiques.

Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Dr Yves Bégin, pour sa confiance et sa générosité. Il a su me communiquer son enthousiasme pour le nord québécois et m'introduire au monde scientifique.

Les travaux de terrain n'auraient pas été les mêmes sans l'aide de M. Thibault Labarre, confrère et ami. Par leurs enseignements, leur amitié et leur disponibilité, Drs Étienne Boucher, Antoine Nicault et Jean-Christophe Aznar ainsi que Mme Joëlle Marion ont permis aux travaux de laboratoire et à l'analyse des résultats d'être complétés. Un merci spécial à Dr Christian Bégin pour m'avoir partagé sa science de l'observation et de la minutie. Merci à l'équipe d'ARCHIVES et aux gens de Radisson.

Chaleureuse accolade à ma famille et mes amis.

Cette maîtrise a été cofinancée par Hydro-Québec, le Consortium sur la climatologie régionale et d'adaptation aux changements climatique Ouranos, le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et le Réseau ArcticNet. Merci au Centre Eau Terre Environnement de l'Institut nationale de la recherche scientifique (INRS-ETE), particulièrement à Mme Suzanne Dussault, pour m'avoir guidé dans les dédales administratifs avec une grande patience.

Table des matières

Résumé	i
Remerciements	iii
Table des matières	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
1. Introduction	1
2. Description de la région	7
2.1. Histoire géologique	7
2.2. Climat régional	8
2.3. Végétation.....	8
2.4. Le rôle des incendies forestiers	9
2.5. L'abondance des tourbières	11
2.6. Les effets de neige.....	13
2.6.1. <i>Chionoturbations</i>	14
2.6.2. <i>Les formes de croissance</i>	16
3. Méthodes	19
3.1. Sélection du site.....	19
3.2. Analyse des effets nivéoéoliens	20
3.2.1. <i>La croissance annuelle et les cernes diagnostiques</i>	21
3.2.2. <i>Les dommages mécaniques</i>	22
3.2.3. <i>Historique du peuplement</i>	24
3.3. Les autres îles du réservoir.....	24
4. Résultats	27
4.1. Structure du peuplement.....	27
4.2. Mortalité.....	29
4.3. Cernes diagnostiques	29
4.3.1. <i>Cernes incomplets</i>	30
4.3.2. <i>Cernes pâles</i>	30

4.3.3. Cernes traumatiques.....	31
4.3.4. Bois de réaction.....	31
4.4. Croissance	35
4.5. Dommages aux arbres.....	36
4.6. Enregistrements climatiques.....	38
5. Discussion.....	43
5.1. Historique du peuplement	43
5.1.1. Période A : 1850 à 1920	43
5.1.2. Période B : 1920 à 1979	44
5.1.3. Période C : 1979 à aujourd'hui.....	46
5.2. Formes de croissance	48
5.2.1. Courbé.....	48
5.2.2. Tigellé.....	49
5.2.3. Ployé.....	50
5.2.4. Hameçon.....	50
5.3. Perspectives futures	51
5.3.1. Projection à court terme.....	51
5.3.2. Projection à long terme : état d'équilibre ?.....	52
6. Conclusion	53
Références.....	55

Liste des figures

Figure 1.	Réservoir Robert-Bourassa.....	4
Figure 2.	Domaines bioclimatiques et zones de végétation	10
Figure 3.	Architecture de l'épinette noire.....	17
Figure 4.	Formes de croissance engendrées par la déflation nivale.....	18
Figure 5.	Île aux Neiges	20
Figure 6.	Dommmages mécaniques.....	23
Figure 7.	Transect d'échantillonnage.....	28
Figure 8.	Période de vie des individus morts qui ont pu être datés	30
Figure 9.	Enregistrements des cernes traumatiques.....	32
Figure 10.	Fréquences relatives des cernes incomplets.....	33
Figure 11.	Fréquences relatives des enregistrements de cernes pâles	33
Figure 12.	Fréquences relatives des enregistrements de cernes traumatiques ...	34
Figure 13.	Fréquences d'enregistrement de bois de réaction.....	34
Figure 14.	Courbes de croissance standardisées des 8 îles du réservoir.....	37
Figure 15.	Courbes de croissance standardisées de l'île aux Neiges	38
Figure 16.	Nombre de dommages recensés à l'intérieur du transect.....	39
Figure 17.	Nombre de dommages recensés sur chaque arbre.	40
Figure 18.	Hauteur du plus haut dommage recensé sur chaque arbre.....	40
Figure 19.	Formes de croissance engendrées par la pression nivéoéolienne	49

Liste des tableaux

Tableau 1.	Études réalisées dans la région du réservoir Robert-Bourassa.....	4
Tableau 2.	Relevé floristique sommaire de l'île aux Neiges.....	21
Tableau 3.	Séries dendrochronologiques d'études passées sur le réservoir.....	25
Tableau 4.	Caractéristiques du transect de l'île aux Neiges.....	28
Tableau 5.	Domages recensés à l'intérieur de chaque zone.....	40
Tableau 6.	Températures et précipitations saisonnières à la station LGA.....	39

1. Introduction

Les grands plans d'eau tels que les océans, les mers et les lacs, influencent le climat notamment en fonction de leur taille et de la latitude à laquelle ils se trouvent (Kopec, 1965; Richards et al., 1966; Changnon et Jones, 1972; Eichenlaub, 1979; Sun et Yildirim, 1989). Dans les régions nordiques, où les eaux de surface sont gelées cinq à six mois par année, cela se traduit par des températures moyennes annuelles plus douces, une amplification des vents locaux et un décalage des saisons (Estoque et Grass, 1981; Arritt, 1987; Bailey et al., 1997; Bégin et al., 1998; Gagnon, 2000). Au printemps, la surface d'eau absorbe l'énergie thermique de l'air et inversement, à l'automne, elle redistribue celle qu'elle a accumulée durant l'été. En hiver, l'eau étant isolée de l'air par la glace, l'influence thermique des lacs est limitée. L'eau gelée devient une surface collectrice de neige, qui peut alors être prise en charge par le vent. Elle est ainsi transportée sur de longues distances avant de s'accumuler sur d'éventuels obstacles (Thom et Grandberg, 1970; Filion et Payette, 1976). De telles conditions ont tendance à créer des milieux de croissance similaires à ceux observés à des latitudes plus élevées. Au Québec, Payette (1983) a noté, autour de grands lacs nordiques, la présence d'enclaves de toundra forestière arbustive (lac à l'Eau Claire) et arborescente (lac Bienville) au sud de leur limites habituelles. L'écologie des rives de ces deux lacs a par la suite fait l'objet d'études permettant d'en isoler les particularités, dont les principales sont : la présence de tourbe (Cloutier, 1995; Filion et Bégin, 1999), la dégradation des arbres sous l'effet de la neige (Boivin et Bégin, 1997; Bégin et Boivin, 2001), le rôle de la première frange d'arbres sur la redistribution de la neige (Boivin et Bégin, 1997; Tremblay, 1999; Bégin et Boivin, 2001; Tremblay et Bégin, 2005) et l'abondance de bois de réaction dans les cernes de croissance des arbres (Bégin, 2001).

Au printemps 1979, la mise en eau du réservoir Robert-Bourassa (2835 km²), anciennement nommé LG-2, s'est achevée. Il s'agit du deuxième réservoir en

importance du complexe LaGrande après le réservoir Caniapiscau (4275 km²)¹. Plusieurs études ont déjà démontré ailleurs que la création d'importants réservoirs modifiait les conditions climatiques locales (Vendrov et Malik, 1965; D'yakonov et Reteyum, 1965; Butorin et al., 1973), mais celles-ci sont théoriques et n'ont jamais été appuyées de mesures ou d'observations sur le terrain. Quelques auteurs ont émis l'hypothèse que le réservoir Robert-Bourassa engendrerait des conséquences similaires (Perrier, 1975; Findlay et Gagnon, 1976). Cette hypothèse a été renforcée par des études préliminaires réalisées une dizaine d'années après sa mise en eau (Litynski et al., 1989; Météoglobe Canada, 1992; Mysak, 1993). Il a ainsi pu être avancé que si l'impact à vaste échelle du réservoir allait être dissipé par le réchauffement climatique global, il existerait néanmoins, à l'échelle locale, des phénomènes perceptibles qui témoigneraient de l'influence climatique des plans d'eau.

Une étude portant sur les répercussions potentielles que pourrait avoir la réalisation du Complexe La Grande sur les communautés et l'environnement de la Jamésie concluait, en 1972, qu'il existait peu d'informations disponibles dans cette région (SEBJ, 1978). C'est dans l'objectif de combler ce manque que la Société d'énergie de la Baie James (SEBJ) a publié, en 1978, un rapport faisant la somme des connaissances acquises jusqu'à ce jour sur le milieu physique de la baie de James et du Nouveau-Québec (SEBJ, 1978). Depuis, le Complexe La Grande a fait l'objet de nombreuses études.

Au cours des étés 1996 et 1997, le Centre d'études nordiques (CEN) a installé cinq stations météorologiques au réservoir Robert-Bourassa : quatre sur des îles (île Centrale, île de la Confusion, île aux Neiges et Relais) et une en marge du réservoir, au lac Capitaine (Figure 1). Ces stations ont été intégrées au réseau SILA du CEN, qui transmet par ondes radiophoniques les données météorologiques enregistrées par ses stations nordiques. Différents paramètres ont ainsi été enregistrés de 1997 à

¹ Les autres grandes étendues d'eau du Québec nordique sont le réservoir LG-3 (2420 km²), le lac Mistassini (2164 km²), le réservoir Manicouagan (2000 km²), le lac à l'Eau-Claire (1253 km²) et le lac Bienville (1047 km²).

2008. La station LGA, opérée par Environnement Canada, enregistre les mêmes depuis 1976, 8 km à l'ouest du réservoir.

Entre 1996 et 2010, le CEN a réalisé plusieurs études au réservoir Robert-Bourassa (Tableau 1). Une première campagne a été menée simultanément à l'installation des stations météorologiques afin d'évaluer l'impact du réservoir sur le climat local (Gagnon, 2000) et son influence sur le développement des organes reproducteurs de l'épinette noire (Sirois et al., 1999), les paramètres de croissance interannuelle des arbres (Simard, 1997; Bégin et al., 1998; Kinnard al, 1998; Tremblay, 1998; Boudreault, 2000), leurs formes de croissance (Tremblay, 1999; Tremblay et Bégin, 2005) et la structure des peuplements riverains (Labrecque, 2000). Une seconde campagne s'est tenue entre 2001 et 2003, qui visait à comprendre la dynamique des forêts riveraines sous l'effet de l'enneigement (Allaire, 2004). Ces études se sont concentrées sur le bassin central du réservoir, à proximité de la station LGA. Or, Bégin et al. (1998) ont noté que les conditions météorologiques variaient localement à l'intérieur du réservoir. Notre étude s'inscrit dans une troisième campagne de terrain, dont l'objectif est d'évaluer l'impact de la dynamique nivéoéolienne sur les forêts riveraines du bassin nord-est, particulièrement sur l'île aux Neiges (Figure 1).

Les études réalisées entre 1996 et 2004 démontrent que la dynamique nivéoéolienne engendrée par le réservoir Robert-Bourassa permet effectivement de recréer des conditions de croissance locales similaires à celles des régions subarctiques. La répartition de la neige sur les rives dépend de la topographie de l'île, de l'orientation de la rive, du fetch et de la structure du peuplement forestier (Payette et Lagarec, 1972; Fillion et Payette, 1976; Elder et al., 1991; Bégin et al., 1998; Tremblay, 1999). En agissant comme barrière contre le vent, les premières franges d'arbres exposées au sud-ouest jouent un rôle prépondérant dans les conditions locales d'enneigement. Certaines îles peuvent ainsi être traversées par les vents sans que la neige ne s'y dépose alors que d'autres auront une capacité élevée de captation. Les niveaux de neige des îles, anciennement des sommets de

collines couverts par environ 1 m de neige en hiver, peuvent atteindre jusqu'à 4 m dans les microdépressions topographiques (Bégin et al., 1998). De telles accumulations, jumelées au travail du vent, perturbent la croissance des arbres et

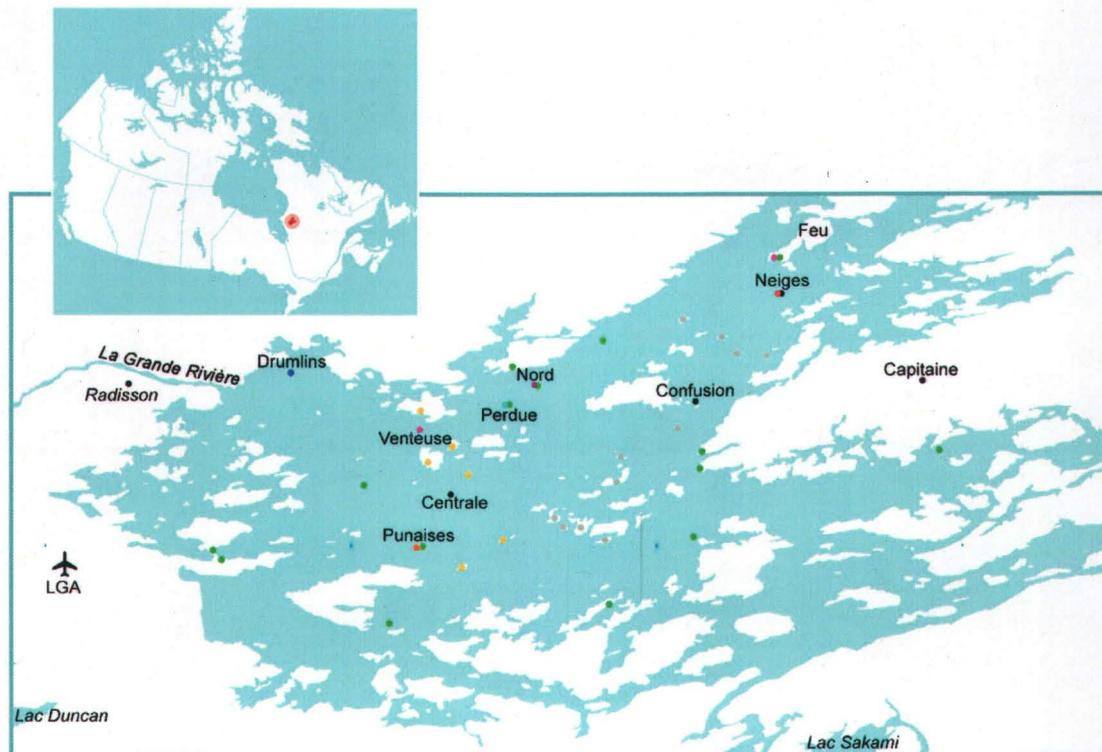


Figure 1. Réservoir Robert-Bourassa. Les sites étudiés lors de précédents travaux ont été notés. Les points gris représentent les îles pour lesquelles des photographies ont été prises lors d'un vol en hélicoptère en mai 2009.

Tableau 1. Études réalisées dans la région du réservoir Robert-Bourassa.

Étude	Id	Terrain	Localisation
SEBJ, 1978		1974-1978	Ensemble des régions de la baie de James et du Nouveau-Québec
Kinnard et al., 1998	•	1994-1995	Îles Venteuse et du Feu
Tremblay, 1998	•	1995	Île Perdue
Simard, 1997	•	1996	Île Nord
Bégin et al., 1998	•	1996	8 sites en périphérie du réservoir et 8 sites sur des îles
Tremblay et Bégin, 2005	•	1996-1997	Île aux Punaises
Sirois et al., 1999		1996	Rive nord-ouest du réservoir
Labrecque, 2000	•	1998	Île aux Drumlins
Boudreault, 2000	•	1998-1999	Île aux Drumlins
Allaire, 2004	•	2001-2003	5 îles au centre du réservoir
Boulanger, 2011	•	2008-2009	Île aux Neiges

modifie leur morphologie. Chaque individu conserve les traces des traumatismes qu'il a subit : inclinaison, ploiement, cicatrice d'arrachement de branche, diminution de la masse foliaire ou perte de dominance apicale (Morin et Payette, 1986; Bégin, 1991). En datant celles-ci à l'aide de la dendrochronologie, on peut reconstituer l'historique d'une forêt et ainsi comprendre l'impact écologique du réservoir. Cette méthode a été appliquée par Boivin et Bégin (1997) au lac Bienville afin d'expliquer la présence d'une enclave de toundra forestière sur l'île Tombolo.

L'objectif principal de cette étude est de décrire l'impact de la nouvelle dynamique nivéoéolienne du réservoir Robert-Bourassa sur la forêt riveraine de l'île aux Neiges. Un travail similaire a été réalisé dans le bassin ouest du réservoir par Tremblay et Bégin (2005) et au lac Bienville par Boivin et Bégin (1997). L'île aux Neiges étant localisée dans le bassin nord-est du réservoir Robert-Bourassa, nous pourrions situer les conditions de croissance qui y prévalent dans le contexte du réservoir et celui des grands lacs nordiques.

2. Description de la région

2.1. Histoire géologique

La région de la baie de James se situe à l'intérieur de la province géologique du Lac Supérieur. L'histoire de ce noyau archéen, formé il y a 2,7 Ga, est ponctuée d'un ensemble de tensions tectoniques ayant profondément marqué sa structure. La Grande Rivière, à l'instar de plusieurs cours d'eau de l'Amérique du Nord, coule dans un corridor formé lors d'une relaxation du continent il y a 2,6 Ga. Plusieurs collisions se sont succédées au Protérozoïque et au Paléozoïque qui ont engendré les provinces géologiques de Rae, de Grenville (les Laurentides) et des Appalaches.

Le Quaternaire a été marqué par une succession de périodes glaciaires et interglaciaires. La dernière glaciation est survenue au Wisconsinien supérieur (23 000 ans à 10 000 ans avant l'actuel) et a profondément marqué les paysages de l'Amérique du Nord. L'inlandsis laurentidien, qui a recouvert presque l'entièreté du territoire canadien, atteignait au maximum glaciaire une superficie de 10,2 à 11,3 Mkm² et une épaisseur variant entre 400 et 3 200 m (Landry et Mercier, 1992). Il comportait trois dômes, dont un au centre du Québec.

Lors du retrait glaciaire, une série de lacs pro-glaciaires et de mers postglaciaires ont ennoyé le nord du continent. La mer de Tyrrell a recouvert la côte des baies de James et d'Hudson au même moment où la mer d'Iberville occupait le pourtour de la baie d'Ungava. En Jamésie, les argiles déposées par le lac pro-glaciaire Ojibway-Barlow puis par la mer de Tyrrell ont permis la formation d'importantes tourbières (Zoltai et Pollett, 1983). Avec le départ des glaciers, le relèvement isostatique a entraîné l'émersion du continent. Il se poursuit aujourd'hui à un rythme de 0,01 m an⁻¹ en Hudsonie (Hillaire-Marcel, 1976).

Les vestiges de l'inlandsis laurentidien sont abondants partout au Québec. L'écoulement glaciaire a engendré l'érosion du socle rocheux et la dispersion de sédiments glaciogéniques sur l'ensemble de la province. Lors de l'avancée glaciaire, des moraines se sont formées sous les glaciers (drumlins, moraines de Rogen, etc.) et à leurs marges (moraines frontales, terrasses de kame, moraines de De Geer, etc.). Elles ont été exposées suite au retrait des glaces, pendant que se consolidaient les eskers dans les réseaux hydrologiques du glacier. La disparition de l'inlandsis laurentidien en Jamésie, il y a 7 000 ans (Richard et al., 1982), a laissé une couche de till mince et discontinue sur tout le territoire.

2.2. Climat régional

Le climat de la région est de type subarctique humide (classification de Köppen-Geiger, SEBJ, 1978). Le réservoir Robert-Bourassa est toutefois fortement influencé par la proximité des baies de James et d'Hudson, à 117 km en aval. Grâce à la station météorologique de l'aéroport de La Grande (LGA), située à quelques kilomètres à l'Ouest du réservoir, Environnement Canada a pu établir les normales climatiques pour la période 1971-2000 (<http://www.climat.meteo.gc.ca>). Les premiers gels surviennent à la mi-septembre et les derniers à la mi-juin, assurant une période sans gel de seulement trois mois. Cette période correspond à la saison de croissance, qui profite en moyenne de 862 degrés-jours de croissance annuellement. La température moyenne minimale en janvier est de -23,2°C et la température moyenne maximale de juillet de 13,7°C. Les vents soufflent de l'ouest, bien qu'au réservoir, ils dévient légèrement dans un axe SO-NE (Bégin et al., 1998). Les précipitations sont de 683,9 mm annuellement, dont 40% (266 cm) tombe sous forme de neige.

2.3. Végétation

La Jamésie se trouve dans la zone de végétation de la forêt boréale. Elle est découpée par les domaines bioclimatiques de la pessière à mousses au sud et de la

peSSIÈre à lichens au nord (Figure 2). Le réservoir Robert-Bourassa est situé au cœur de cette dernière, à 250 km au sud de la toundra forestière. L'écologie du nord québécois a fait l'objet de nombreuses études et plusieurs auteurs ont participé à la délimitation des régions écologiques telles que présentées ici (Rousseau, 1952; Hare et Ritchie, 1972; Ducruc et al., 1976; Hustich, 1979; Gerardin, 1980; Payette, 1983). Au Canada, la forêt boréale couvre environ 3,5 Mkm² sur plus de 10° de latitude. Son expansion a suivi le recul des glaciers à l'Holocène (Richard et al., 1982).

Seules les espèces d'arbre capables de s'adapter à des transformations drastiques de leur environnement composent la forêt boréale. En résulte une biodiversité pauvre où l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] BSP), l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss) et le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb) dominant. Le sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.), le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.), le bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh.) et le mélèze (*Larix laricina* (Du Roi) Koch) constituent les autres espèces arborescentes que l'on retrouve à cette latitude (Payette, 1983; Sirois, 1997).

2.4. Le rôle des incendies forestiers

La conservation des assemblages floristiques des domaines bioclimatiques de la forêt boréale est intimement dépendante des incendies forestiers (Heinselman, 1973; Cogbill, 1985). Il est toutefois possible que suite au passage d'un feu, certaines espèces végétales présentes soient incapables de recoloniser les brûlis. De tels cas mènent à l'apparition d'enclaves forestières qui détonent avec le domaine dans lequel elles se trouvent (Payette, 1992). Ces communautés peuvent perdurer sous un régime de feux d'intensité et d'intervalles particuliers. Cependant, si les incendies constituent un vecteur de succession dans la forêt boréale et la taïga, ils sont responsables de dépeuplements majeurs dans la toundra forestière, où la régénération est limitée (Payette et Gagnon, 1985).

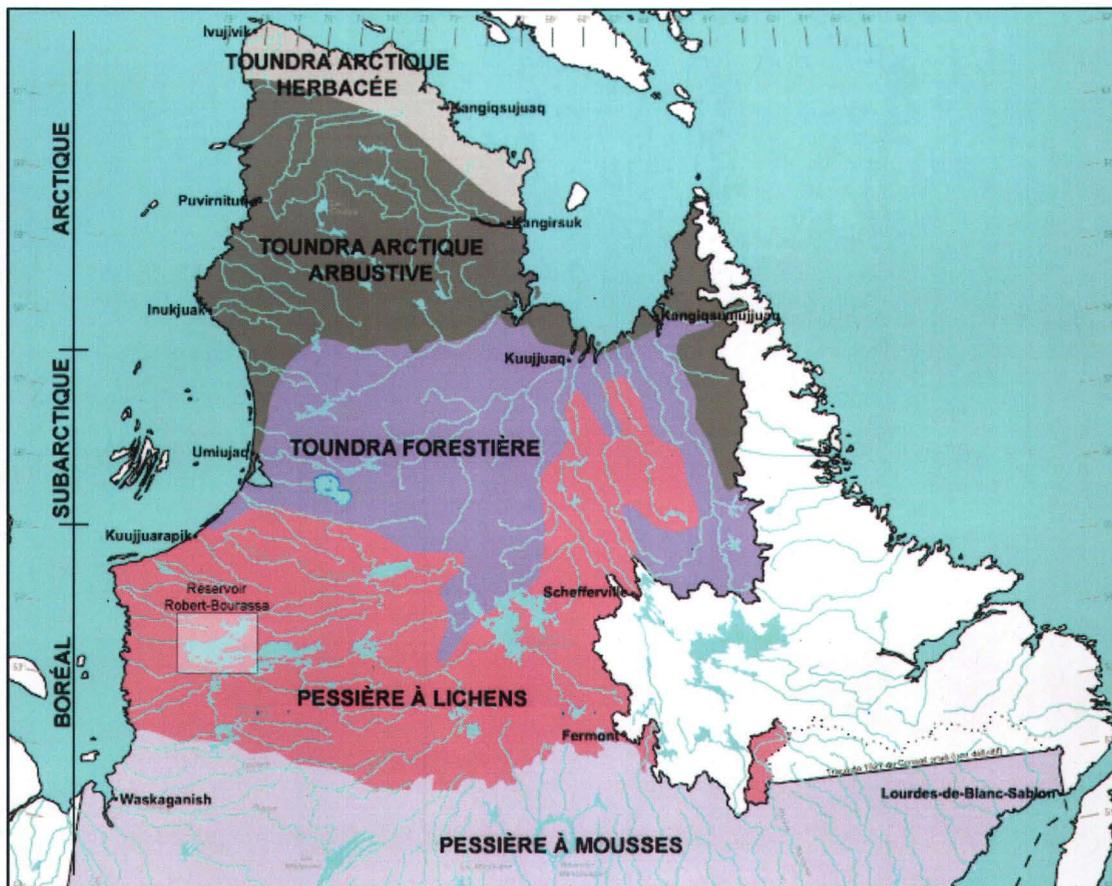


Figure 2. Domaines bioclimatiques et zones de végétation du nord du Québec (adaptée de la Carte des domaines bioclimatiques d'Environnement Canada et de Payette (1983)).

La récurrence des feux intervient de façon particulière auprès des populations de pins gris. Les cônes sérotineux de cette espèce s'ouvrent à des températures élevées et disséminent rapidement leurs abondantes réserves de graines (Johnson et Gutsell, 2009). En milieu sec, la régénération précoce du pin gris (il produit des graines viables au terme d'une décennie, comparativement à l'épinette qui n'a de graines viables qu'après environ 40 ans) lui permet de dominer son environnement après le passage d'un incendie (Lavoie et Sirois, 1998). De courts intervalles entre les feux assurent la pérennité des pinèdes. L'épinette noire ne redevient dominante dans ces formations qu'après une période sans feu de 150 ans (Despons et Payette, 1992).

La période de retour des feux varie selon les régions; en Jamésie, elle est d'environ 100 ans (Payette et al., 1989). Les peuplements les plus anciens autour de la baie de James ont environ 250 ans (Cogbill, 1985; Morneau et Payette, 1989).

2.5. L'abondance des tourbières

Les basses-terres jamesiennes et hudsoniennes constituent le deuxième plus vaste territoire à haute concentration de tourbières au monde, secondes seulement derrière la plaine sibérienne (Gorham, 1991; Payette et Rochefort, 2001). Au Canada, les tourbières couvrent 12% du territoire, dont 97% sont concentrés en zones subarctique et boréale (Tarnocai, 2006). Dans la région de la Grande Rivière, la proportion de recouvrement atteint 29% (Pelletier et al., 2007). Une tourbière est un habitat humide où la biomasse produite annuellement par la photosynthèse est plus importante que celle qui est éliminée par la décomposition (Payette, 1984; Payette et Rochefort, 2001). Cette différence résulte en une accumulation de tourbe. La matière organique ainsi empilée, possiblement durant plusieurs millénaires, est une source unique d'enregistrements paléoécologiques.

Deux processus peuvent mener à la formation de tourbière, suivant un ensemble de facteurs allogènes (e.g. le climat) et autogènes (e.g. la végétation). Le *comblement* d'un plan d'eau survient lorsque la végétation aquatique et riveraine colonise un lac ou un étang jusqu'à son centre. Les tourbières ayant cette origine ont une taille limitée. Dans le haut-boréal et le subarctique, où elles peuvent atteindre des proportions impressionnantes, les tourbières se forment surtout par *paludification*. La paludification se produit sur des sites généralement mal drainés où le bilan hydrique est positif (Payette et Rochefort, 2001). De tels bilans sont le résultat d'importantes précipitations ou d'évaporation restreinte. Les régions froides et humides possédant un relief relativement plat et des sols à faible capacité filtrante sont donc propices à la formation de tourbières.

On distingue généralement deux types de tourbières, en fonction de la façon dont elles s'alimentent en eau :

Les tourbières ombrotrophes, ou *bogs*, sont hydrologiquement isolées et ne récoltent que l'eau des précipitations. Il en résulte un milieu très pauvre en nutriments. La nappe phréatique se situe à la surface ou juste en dessous. Les tourbières ombrotrophes sont acides et sont principalement colonisées par les sphaignes.

Les tourbières minérotrophes, ou *fens*, sont alimentées par la nappe phréatique souterraine. Elles sont donc riches en éléments minéraux, qui permettent la croissance d'éricacées. La nappe phréatique se trouve également tout près de la surface.

Les tourbières sont une composante importante du cycle du carbone. Le taux de décomposition de la matière organique détermine si elles en sont une source ou un puits (Gorham, 1991). Par l'accumulation de tourbe, elles piègent le carbone, qui est conservé par la dégradation lente de la phytobiomasse. Par contre, lorsque la matière organique se décompose, elle relâche du gaz carbonique (CO₂) ou du méthane (CH₄) dans l'atmosphère, deux gaz susceptibles d'aggraver l'effet de serre. Les scénarios de changements climatiques prévoient que le réchauffement sera particulièrement senti dans les régions nordiques. En zones subarctique et haut-boréale, où se trouve la majorité des tourbières gelées à l'année, une hausse des températures entraînerait potentiellement une saturation en eau des milieux suite à la fonte du pergélisol (Tarnocai, 2006). Cette saturation, jumelée à un climat plus doux, produirait une augmentation de la décomposition anaérobie et donc de l'émission de CH₄. Dans le sud de la forêt boréale, le réchauffement du climat causerait plutôt l'assèchement des milieux tourbeux. L'entrée d'oxygène dans ces écosystèmes augmenterait la décomposition aérobie et par conséquent l'émission de CO₂ (Tarnocai, 2006).

2.6. Les effets de neige

Dans le nord du Québec, la neige recouvre le sol durant plus de la moitié de l'année. La survie de plusieurs espèces végétales dépend de la protection qu'elle procure contre le vent et le froid. Lorsque présente en trop grande quantité, la neige devient néanmoins un vecteur de perturbations. Sa distribution est donc un paramètre majeur de la dynamique des écosystèmes nordiques.

Le patron de distribution de la neige, i.e. la densité et la profondeur relative de la neige à différents points dans l'espace, demeure plus ou moins le même d'année en année (Timoney et al., 1992). Le transport et le dépôt de neige sont modulés par la force et la direction des vents, la température de l'air, la fréquence des tempêtes et par la présence de capteurs, comme la topographie et la végétation (Billings et Bliss, 1959; Payette et al., 1973). La neige s'accumule dans les dépressions et aux pieds d'obstacles. Les variations de niveaux de neige modifient la vitesse de fonte au printemps ainsi que l'humidité du sol (Scott et al., 1993; Scott et Rouse, 1995). Au fond de dépressions enneigées durant l'hiver, des plaques de tourbe peuvent se développer au cours de la saison de croissance grâce à l'abondance favorable d'eau de fonte (Mathieu et al., 1987; Cloutier, 1995; Filion et Bégin, 1998).

Autour des environnements plats et ouverts comme les grands plans d'eau, les franges forestières sont soumises à des conditions d'enneigement particulières. Les grandes surfaces collectrices captent la neige précipitée qui, sous de basses températures, est facilement prise en charge par le vent (Filion et Payette, 1976). Celui-ci profite de larges espaces dégagés pour prendre de la vitesse et transporter sur de longues distances les cristaux en suspension. À la rencontre d'obstacles, la trajectoire du vent est brisée. La neige est déposée aux pieds des barrières imperméables jusqu'à l'atteinte d'une saturation topographique. Toutefois, lorsque l'obstacle peut être traversé par le vent, comme c'est le cas des forêts ouvertes, la neige tourbillonne et se dépose à l'arrière de l'obstacle en question (Boivin et Bégin, 1997). D'importantes congères peuvent ainsi être créées. L'action abrasive de la

neige et son accumulation engendre des effets de bordure qui modifient la structure des communautés forestières. Les arbres les plus exposés aux vents adoptent des formes de croissance érodées. Leur tige est souvent inclinée. Derrière eux, les arbres subissent les effets de la surcharge nivale, comme en témoigne l'abondance de dommages mécaniques (Boivin et Bégin, 1997). Ces phénomènes sont très fréquents sur les îles des grands lacs subarctiques (Boivin et Bégin, 1997, Bégin et Boivin, 2001).

2.6.1. Chionoturbations

Nous emploierons ici le terme chionoturbation pour désigner les perturbations écologiques et morphologiques engendrées par la neige. Les chionoturbations sont de natures diverses, qui engendrent des réactions distinctes chez un arbre ou un peuplement. Nous nous attarderons ici à celles qui affectent la structure de l'épinette noire.

2.6.1.1. Abrasion des méristèmes

Sous des températures froides, les cristaux de neige atteignent une dureté équivalente à celle de la calcite (Rikhter, 1963). Transportés par le vent, les cristaux entrent en collision avec les feuilles des arbres ou leurs bourgeons, qui peuvent être arrachés ou tués (Payette, 1974; Bégin, 1991; Scott et al., 1993; Pereg et Payette, 1998). Les méristèmes situés sous la neige sont protégés contre cet effet. Par contre, au-dessus du niveau de neige se crée une zone d'abrasion active qui peut atteindre 1 à 2 m en forêt (Bégin et Boivin, 2001). Les années durant lesquelles un arbre croît à travers cette zone sont critiques pour son développement futur. Si le méristème apical est tué, l'arbre s'adapte ou il dépérit rapidement. Chez l'épinette noire, la perte de dominance apicale est comblée par la réitération (Bégin, 1991). Cette stratégie assure à l'espèce une grande plasticité phénotypique qui explique sa présence à de très hautes latitudes. Elle est aussi à l'origine de formes de croissance originales (Payette, 1974; Lavoie et Payette, 1992).

2.6.1.2. Perte foliaire

L'abrasion du feuillage survient au cours d'épisodes de forts vents ou lorsque les aiguilles se dessèchent et tombent. Le deuxième cas, appelé dessiccation, a fait l'objet de nombreuses études (Wardle, 1968; Stockton et Fritts, 1973; Baig et Tranquillini, 1976, 1980; Frey, 1983; Hadley et Smith, 1983, 1986). Lorsque, par radiation solaire, la température des aiguilles dépasse celle de l'air, la pression augmente à l'intérieur des feuilles. Celle-ci est évacuée par l'évapotranspiration de l'eau qu'elles contiennent (Baig et Tranquillini, 1980). L'équilibre hydrique d'une aiguille est maintenu grâce à une cuticule qui la recouvre et empêche l'eau d'être complètement évacuée. L'épaisseur de cette cuticule dépend des conditions de croissance au cours des 18 mois précédant l'hiver (Wardle, 1968). Une cuticule trop mince ne peut prévenir adéquatement la déshydratation des aiguilles (Baig et Tranquillini, 1976, 1980; Hadley et Smith, 1983). Durant les mois où le sol est gelé, l'organisme est incapable d'en pomper l'eau et ne peut remplacer celle évaporée par les feuilles. Chez l'épinette noire, la dessiccation semble toutefois être un phénomène marginal (Marchand et Chabot, 1978). L'espèce est en effet particulièrement résiliente aux déficits hydriques (Oechel et Lawrence, 1985). Les pertes foliaires qui affectent les forêts boréales et subarctiques sont donc majoritairement attribuables à des vents violents.

Le résultat de l'abrasion de l'appareil chlorophyllien est un élagage du tronc. Sans la capacité photosynthétique des feuilles, les branches dépérissent et meurent. L'abrasion par le vent peut survenir d'un seul côté de l'arbre, ce qui engendre des formes de croissance en drapeau (Payette, 1974).

2.6.1.3. Bris d'organes

Lorsque le poids de la neige dépasse la capacité d'une branche ou d'une tige à le supporter, celle-ci se déchire partiellement ou complètement (Morin et Payette, 1986; Boivin et Bégin, 1997; Bégin et Boivin, 2001). Une branche se rompt soit par

traction, lorsque ses aiguilles sont coincées dans la glace et que, sous le poids de la neige, elles tirent la branche vers le sol, soit par l'énergie cinétique de la neige qui fait pression sur l'organe. C'est généralement lorsque la neige se compacte ou que son contenu en eau augmente que ces bris surviennent (Bégin et Boivin, 2001). Si l'organe survit et se cicatrise, on le dit ployé; dans le cas contraire, on qualifie la cassure d'arrachement de branche ou de bris de tige. Le nombre de cicatrices d'arrachement engendrées par un événement donné tendent à disparaître avec le temps puisqu'elles sont progressivement couvertes par l'accumulation de couches de bois (Morin et Payette, 1986).

Les relais apicaux (réitérats apicaux), les cicatrices d'arrachement de branche et les cicatrices de ploiement peuvent être datés par dendrochronologie et permettent ainsi d'évaluer la hauteur des niveaux de neige passés. Cependant, comme il s'agit d'indicateurs d'événements ponctuels, il est impossible de les utiliser afin de reconstituer des séries climatiques continues (Bégin et Boivin, 2001).

2.6.2. Les formes de croissance

Les chionoturbations peuvent affecter plus ou moins drastiquement le développement normal d'un arbre. Celui-ci assure sa survie en déployant des stratégies d'adaptation propre à chaque espèce. Chez l'épinette noire, la réitération permet à l'adaptation aux traumatismes (Bégin, 1991; Bégin et Filion, 1999). Elle s'opère lorsqu'un individu subi une lésion à l'un de ses axes. Par l'éclosion d'un bourgeon latent (réitération proleptique) ou par la dédifférenciation d'un axe en croissance (réitération syleptique), la portion nécrosée de l'organisme est remplacée (Bégin, 1991). L'arbre préserve ainsi son intégrité architecturale (Figure 3). Sa morphologie en est cependant affectée, de sorte qu'elle dévie du port normal de l'arbre, dit symétrique (Payette, 1974). La réitération peut également être adaptative lorsque le potentiel photosynthétique d'un individu tend à augmenter par l'apparition d'axes surnuméraires.

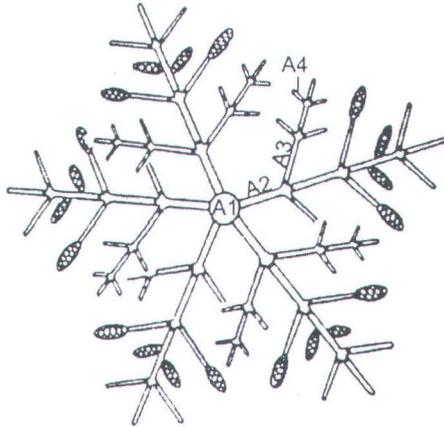


Figure 3. L'architecture de l'épinette noire est structurée en axes d'ordre 1 (A1), 2 (A2), 3 (A3) et 4 (A4) (adaptée de Bégin, 1991).

D'un point de vue strictement morphogénétique, il est hasardeux de classer les formes que peut prendre l'épinette noire. Une forme de croissance non conforme peut être définie comme l'expression d'un développement s'étant écarté du programme architectural. Tout processus réitératif est considéré comme une déviation de ce programme. Or, puisque c'est par la réitération adaptative qu'une épinette noire parvient à densifier son appareil photosynthétique, le processus de la réitération fait partie de son développement normal (Bégin, 1991). De plus, la fréquente mortalité de méristèmes apicaux dans les environnements hostiles du Boréal et du Subarctique engendre des réitérats qui sont parfois nombreux chez un même individu. Bien que le *modèle architectural* de l'arbre soit toujours rigoureusement respecté, son *programme architectural théorique* l'est donc très rarement. D'un point de vue descriptif, on peut néanmoins reconnaître quelques formes de croissance apparaissant lorsque certaines conditions sont rencontrées. Elles deviennent des outils précieux facilitant la compréhension d'un milieu.

Payette (1974) et Lavoie et Payette (1992) ont décrit les formes de croissance témoignant du gradient d'exposition au vent et à la neige (Figure 4). La forme en drapeau (*flagged*) désigne ainsi un arbre présentant moins d'axes secondaires sur un côté de son tronc que l'autre. On qualifie de bougeoir (*skirted*) les arbres n'ayant qu'une seule tige et dont le feuillage est dégradé dans les mètres au-dessus du

niveau de neige. Les individus dits en verticilles (*whorled*) sont le produit de plusieurs réitérats syleptiques radiaux apparus suite à l'ablation du méristème apical par déflation nivale. Dans les sites présentant les conditions d'exposition les plus sévères, aucune tige ne parvient à croître au travers de la zone d'abrasion supra-nivale. Les arbres adoptent alors les formes fructitoïde (*infra-nival cushion*) ou empétröïde (*mat*), qui composent les krummholz (Payette, 1974).

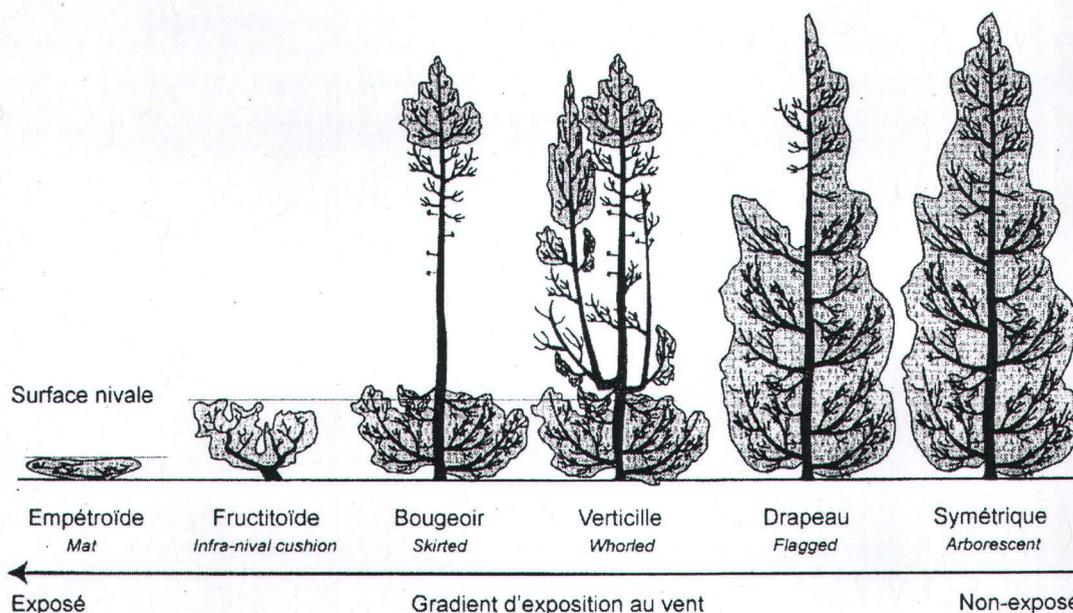


Figure 4. Formes de croissance exprimant le degré d'exposition à la déflation nivale (adapté de Pereg et Payette, 1998).

3. Méthodes

3.1. Sélection du site

Les plages des îles du réservoir sont couvertes de troncs d'arbres morts suite à l'inondation de la forêt. Une fois ennoyés, certains se sont dégradés avant d'être déracinés ou fauchés par le déplacement des glaces puis portés par les vagues jusqu'aux rivages des îles. À l'île aux Neiges, ces crêtes de bois peuvent atteindre 4 m de largeur et 2 m de hauteur. Elles font barrière au vent et retiennent la neige. Entre les crêtes de bois et le début de la forêt, des arbustes capables de résister à l'immersion occasionnelle du rivage se sont implantés. La frange qu'ils composent a une longueur de 8 m sur la rive sud-ouest de l'île.

Le site de l'île aux Neiges a été sélectionné en 1997 pour y quantifier l'emprise des facteurs climatiques sur la végétation riveraine. Malgré sa petite taille (95 m par 355 m), le fait qu'elle constitue le premier rempart aux vents en provenance du sud-ouest sur une distance de 6 km lui assure d'importantes accumulations nivales. C'est particulièrement le cas sur la rive sud-ouest, où la dégradation des arbres et du peuplement forestier est évidente. C'est là que les efforts de récolte d'information se sont concentrés. Une station météorologique principale mesurant la température et l'humidité de l'air et du sol, la vitesse et la direction des vents a été installée sur la rive sud-ouest de l'île, à 20 m du niveau des hautes eaux (Figure 5).

Un transect de 10 m par 75 m a été délimité sur cette rive à des fins d'échantillonnage. Il débute au même endroit que la forêt, à 12 m de la ligne des hautes eaux, et s'achève à l'intérieur de la forêt fermée. Il couvre ainsi tout le gradient d'accumulation nivale de ce côté de l'île. Le transect a été divisé en 30 quadrats de 5 m par 5 m, à l'intérieur desquels la position des arbres a été notée et le relevé floristique effectué. L'épaisseur de tourbe a été mesurée aux quatre coins

de chaque quadrat en utilisant une sonde graduée. La topographie a été enregistrée à l'aide d'un théodolite Leica™ TC-705 (précision = 2 mm ± 2 ppm).

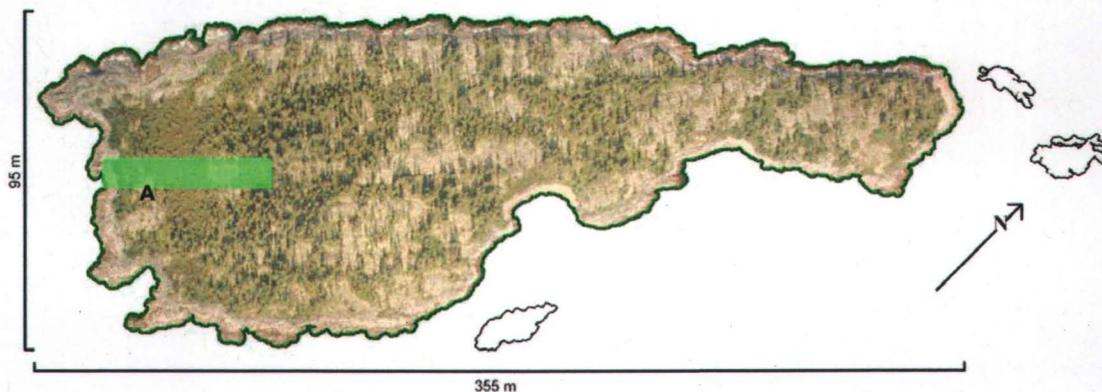


Figure 5. Île aux Neiges. Le transect échantillonné est représenté en vert et la station météorologique par la lettre A.

La végétation à l'intérieur du transect est représentative de celle qui domine l'ensemble de l'île aux Neiges (Tableau 2). La strate arborescente est exclusivement composée d'épinette noire (*Picea mariana*) et de pin gris (*Pinus banksiana*). La strate arbustive haute comprend l'aulne vrai (*Alnus viridis* (Chaix.) D.C.) et le saule à feuilles planes (*Salix planifolia*); la strate arbustive basse est surtout peuplée par le thé du Labrador (*Rhododendron groenlandicum* (Oerder) Kron & Judd), la kalmia à feuilles d'andromèdes (*Kalmia polifolia* Wangenh.) et le bleuet (*Vaccinium augustifolium* Aiton). La strate herbacée est peu représentée. Les lichens *Cladina stellaris* et *Cladina rangiferina* et les sphaignes *Sphagnum russowii* et *Sphagnum riparium* se partagent la strate muscinale.

3.2. Analyse des effets nivéoéoliens

Différents aspects de la communauté riveraine et des arbres qui la composent ont été retenus afin de vérifier l'impact écologique des perturbations climatiques engendré par la création du réservoir.

Tableau 2. Relevé floristique sommaire de l'île aux Neiges.

Strates	Espèces
Arborescente	<i>Picea mariana</i> <i>Pinus banksiana</i>
Arbustive haute	<i>Alnus viridis</i> <i>Salix planifolia</i>
Arbustive basse	<i>Chamaedaphne calyculata</i> <i>Kalmia polifolia</i> <i>Rhododendron groenlandicum</i> <i>Vaccinium augustifolium</i> <i>Vaccinium vitis-idaea</i>
Herbacée	<i>Carex sp.</i> <i>Maianthemum canadense</i> <i>Rubus chamaemorus</i>
Muscinale	<i>Cladina stellaris</i> <i>Cladina rangiferina</i> <i>Sphagnum russowii</i> <i>Sphagnum riparium</i>

3.2.1. La croissance annuelle et les cernes diagnostiques

Les courbes dendrochronologiques couvrant la période pré-mise en eau jusqu'à aujourd'hui permettront de vérifier si un changement dans la croissance est survenu depuis 1979. Elles ont été construites à partir d'individus matures au moment de la mise en eau afin de minimiser l'influence de l'âge sur la croissance. À l'île aux Neiges, étant donnée le faible taux de croissance des arbres, les épinettes de 1 m ou plus ont été retenues pour l'échantillonnage. Une section transversale a été prélevée à la base de chacune d'elle. Au total, 415 épinettes vivantes et 103 mortes ont été échantillonnées. De plus, les sections récoltées à la base de 30 épinettes noires matures, réparties sur l'ensemble de l'île, ont servi à construire une courbe dendrochronologique de référence. Les échantillons ont été poncés finement (grain 400) et datés à la main suivant 3 rayons. Les cernes diagnostiques (cernes

incomplets, cernes pâles, cernes traumatiques et bois de réaction) ont également été relevés sur 307 individus lors du pointage. Sur 108 individus, les cernes de croissance étaient trop minces pour permettre de détecter efficacement les cernes diagnostiques.

Un individu à tous les mètres à partir du début du transect a été retenu pour en mesurer l'accroissement radial annuel. L'arbre le plus près d'un mètre donné était sélectionné. Parfois, aucun arbre ne se trouvait à proximité. Au total, les cernes de croissance de 66 arbres ont été mesurés à l'aide d'un micromètre Velmex™ (précision = 0,002 mm) monté sous loupe binoculaire Leica™ 40X (oculaire 10x) le long de 2 rayons opposés plutôt que 3. La présence de bois de réaction chez la plupart des individus mesurés biaise positivement les courbes de croissance. En utilisant un rayon tracé au centre du bois de réaction (à l'aval du plan d'inclinaison) et un autre à l'opposé (en amont), on facilite l'évaluation de l'impact réel de la mise en eau sur la croissance d'un arbre. Les erreurs de datation ont été corrigées à l'aide du logiciel COFECHA (Holmes, 1983). Le même logiciel a été utilisé pour interdater les séries de cernes des arbres morts.

Les courbes de croissance ont été standardisées à l'aide d'une RCS (*Regional Curve Standardization*, Esper et al., 2003) afin d'éliminer l'influence des facteurs biologiques sur les séries dendrochronologiques. La RCS a été construite à partir de données recueillies dans 18 sites à proximité du réservoir Robert-Bourassa. Elles ont été fournies par le groupe de recherche ARCHIVES.

3.2.2. Les dommages mécaniques

Un relevé des arrachements de branche (Figure 6a), ploiements (Figure 6b) et bris de tige (Figure 6c) a été effectué sur l'ensemble des arbres vivants du transect. Le nombre d'indicateurs de traumatisme par tige et la hauteur du plus élevé d'entre eux ont été notés. Quarante-trois épinettes ont été sélectionnées afin d'en dater les dommages mécaniques. Les cicatrices d'arrachement ont été prélevées par

coupe transversale de la tige sous forme de rondelle, et les cicatrices de ploiment et les relais apicaux ont été apportés en entier au laboratoire pour être coupés avec précision. En l'absence de données météorologiques, la répartition des dommages permettra d'évaluer grossièrement la distribution de la neige.

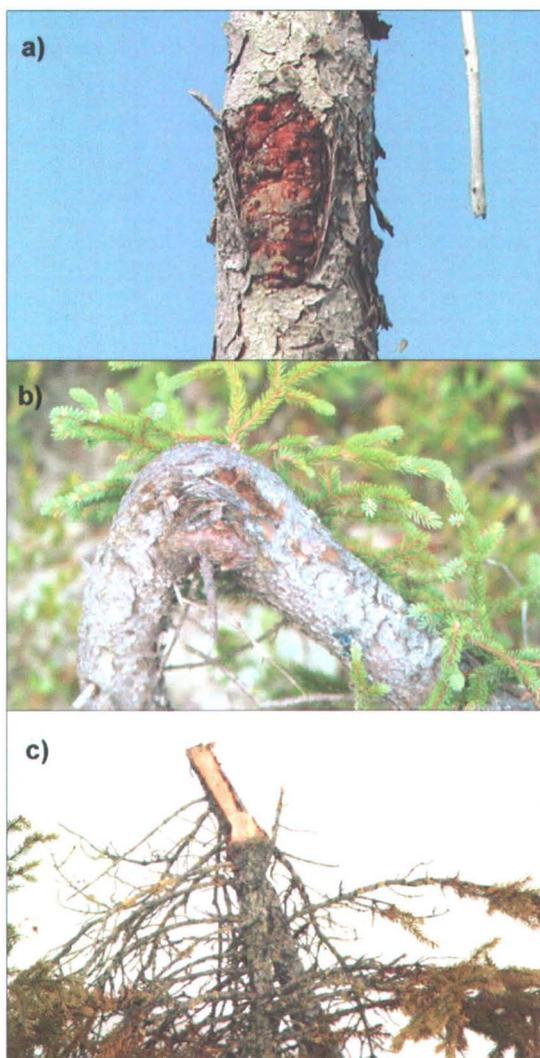


Figure 6. Dommages mécaniques : a) arrachement de branche, b) ploiment, c) bris de tige entraînant une perte de dominance apicale.

Les échantillons ont été poncés au grain 400. L'année de formation des cicatrices d'arrachement et de ploiment a pu être déterminée en dénombrant les cernes de croissance apparus depuis le bris (Morin et Payette, 1986). Souvent, la présence de canaux résinifères à l'intérieur de cernes ou celle de résine venue fermer la plaie

facilitait la datation. Les pertes de dominance apicale ont été datées en comparant le nombre de cernes de la partie vivante de la tige à celui de la partie morte.

3.2.3. Historique du peuplement

La longueur de la tige des arbres, leur degré d'inclinaison par rapport au sol et le type de sol au point d'enracinement ont été enregistrés pour l'ensemble des épinettes échantillonnées. La densité du peuplement a pu être calculée grâce au positionnement des arbres. En connaissant l'année de mortalité des individus, l'ouverture du paysage depuis la mise en eau du réservoir a pu être évaluée. Ces données ont permis de caractériser la communauté riveraine et de la diviser en zones homogènes. Sur le côté ouest de l'île, six pins gris ont été échantillonnés afin de connaître l'année de passage du dernier feu sur la rive sud-ouest.

3.3. Les autres îles du réservoir

Grâce aux travaux effectués depuis 1994 (Bégin et al., 1998; Kinnard et al., 1998), sept courbes dendrochronologiques témoignant de la croissance des arbres sur les rives ouest des îles étaient disponibles pour notre étude (Tableau 3). Ces séries ont été construites à partir d'arbres récoltés en milieux bien drainés. Cela n'a pas été le cas à l'île aux Neiges, où la présence de tourbe indique un sol humide. Le degré de corrélation entre les courbes des îles du réservoir et la chronologie de référence de l'île aux Neiges a été calculé afin de comparer le synchronisme des événements affectant la croissance des arbres.

L'échantillonnage sur l'île Venteuse a été effectué durant les étés 1994 et 1995 (Kinnard et al., 1998). Le site a été sélectionné sur la rive ouest de l'île dans un milieu mésique et jugé homogène en ce qui a trait à la pente, l'exposition et la densité du peuplement. Sur cette parcelle, une section transversale a été prélevée entre 30 et 90 cm de la base sur 22 épinettes noires matures, symétriques et sans dommage apparent. La datation de pins gris a permis d'obtenir l'âge du dernier feu,

qui date du milieu du XIX^e siècle. Après avoir été poncées, les sections ont été analysées en laboratoire à l'aide des mêmes instruments que ceux utilisés dans notre étude. La largeur des cernes annuels a été mesurée le long de deux rayons.

Tableau 3. Séries dendrochronologiques de peuplements insulaires échantillonnés au cours d'études passées sur le réservoir Robert-Bourassa.

Île	Étude	N	Longueur de la série (années)
1 Île Venteuse	Kinnard et al., 1998	22	77
2 Île du Feu	Bégin et al., 1998	6	137
3 Île Nord	Bégin et al., 1998	20	69
4 Île Sud	Bégin et al., 1998	20	34
5 Île Est	Bégin et al., 1998	20	59
6 Île Ouest	Bégin et al., 1998	20	62
7 Île aux Punaises	Bégin et al., 1998	21	66
8 Île aux Neiges	Boulanger, 2011	66	204

Les îles Nord, Sud, Est, Ouest, du Feu et aux Punaises ont été visitées au cours de l'été 1997 (Figure 1). Elles ont été sélectionnées pour leur hauteur (3 m et plus), leur taille (moins de 300 m de diamètre) et la longueur de leur fetch (1 km et plus). Les peuplements retenus se trouvaient également sur la rive ouest des îles, sur sol bien drainé. Une vingtaine de jeunes arbres (entre 35 et 50 ans) ont été échantillonnés à 30 cm de leur base. Le travail effectué en laboratoire est le même que celui de l'île Venteuse.

4. Résultats

4.1. Structure du peuplement

Le transect peut être divisé en quatre zones, en fonction de la forme de croissance des arbres, de leur hauteur, du type de sol et de la structure de la forêt (Figure 7, Tableau 4) :

Zone I (0 à 17,5 m). Les arbres de plus de 1 m ont une taille moyenne plus élevée que dans les autres zones (moyenne = 370 cm). Ils constituent une barrière contre le vent qui souffle du sud-ouest. L'action abrasive du vent et de la neige entraîne la dessiccation du feuillage et la mort des bourgeons et des branches. Par conséquent, les arbres ont une forme de croissance en drapeau et sont dégarnis sur la majeure partie de leur hauteur. Souvent, seule la cime porte encore l'appareil chlorophyllien. Le sol est couvert de tourbe de sphaigne, indiquant un milieu humide. La zone I a connu proportionnellement le plus de mortalité suite à la mise en eau (22,4%). Sa perte de recouvrement, i.e. le nombre d'arbres morts par m² depuis 1979, est aussi la plus importante du transect (0,14 arbre m⁻²).

Zone II (17,5 à 33,4 m). La taille des arbres décroît brusquement au-delà de 17,5 m à l'intérieur du transect et jusqu'à 33,4 m (moyenne = 199 cm); deux arbres seulement dépassent 410 cm de hauteur. Les épinettes sont chétives et croissent sur un tapis de tourbe qui dépasse parfois le mètre d'épaisseur. Plusieurs individus ont été endommagés par la neige, que ce soit par bris d'organe ou par ploïement. Le taux de mortalité (9,7%) y est le plus faible. Cependant, la perte de recouvrement (0,1 arbre mort m⁻²) se classe deuxième en importance, n'étant devancé que par la zone I. Ceci s'explique en partie par la densité de loin la plus élevée des quatre zones (0,8 arbre m⁻²).

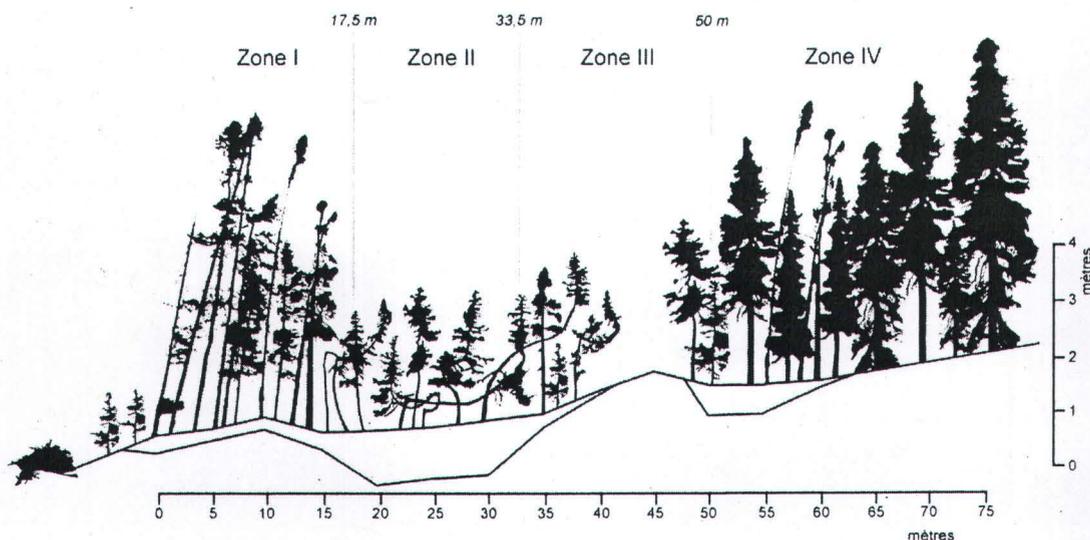


Figure 7. Transect d'échantillonnage. La zone grise représente l'épaisseur de tourbe.

Tableau 4. Caractéristiques du transect de l'île aux Neiges.

	Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV	Transect
Formes de croissance	Courbé, drapeau	Tigellé, ployé, cassé	Courbé	Symétrique	-
Superficies (m ²)	175	159	166	250	750
N individus	107	145	55	108	415
Densités (individus m ⁻²)	0,61	0,91	0,33	0,43	0,55
Taux de mortalité (depuis 1979)	25,2%	9,7%	21,8%	7,5%	14,6%
Pertes de recouvrement (depuis 1979)	0,15	0,09	0,07	0,03	0,08

Zone III (33,4 à 50 m). Le roc affleure sur la majorité de la superficie de cette zone. Les arbres, chétifs, croissent avec difficulté. La densité du peuplement est la plus faible du transect (0,2 arbre m⁻²) et le taux de mortalité est élevé (21,8%). La hauteur moyenne des arbres n'atteint pas 3 m (moyenne = 292 cm). La perte de recouvrement suit le gradient depuis la rive avec 0,1 arbre mort m⁻².

Zone IV (50 à 75 m). C'est le début de la forêt fermée. Les arbres ont un port symétrique, bien que le feuillage débute souvent quelques mètres au-dessus du sol. Ils sont de bonne taille (moyenne = 358 cm) et semblent peu affectés par les conditions hivernales ; seulement deux individus portent des indicateurs de traumatisme. La rareté des plaques de tourbe indique un sol relativement sec. La perte de recouvrement est la plus faible du transect (0,03 arbre m⁻²); il en est de même pour le taux de mortalité (0,03%).

4.2. Mortalité

Des 103 arbres morts retrouvés à l'intérieur du transect, 77 ont pu être datés. La mort de 67 (87%) d'entre eux est survenue suite à la création du réservoir (Figure 8). La dégradation rapide des troncs d'arbres morts, accélérée par l'humidité du milieu, empêche d'estimer l'année de mort de ceux qui n'ont pu être interdatés. Les arbres morts depuis les trente dernières années ont généralement été bien conservés, permettant d'obtenir des taux de mortalité depuis la mise en eau. Le taux de mortalité est à son plus bas dans les zones II et IV. L'ouverture du paysage suit un gradient négatif depuis la rive jusqu'à la forêt fermée, i.e. la proportion d'arbres morts décroît en s'éloignant de l'eau. La mort, en l'espace de quelques années, de plus de 14,5% de la population riveraine, a certainement modifié les conditions de croissance des arbres. Le dernier cerne visible sur les arbres morts comprenait toujours des cellules de bois final. Cela signifie que les individus sont décédés en dehors de la saison de croissance, probablement durant l'hiver.

4.3. Cernes diagnostiques

Les fréquences d'enregistrement des divers cernes diagnostiques relevés ont toutes connu une hausse depuis la mise en eau du réservoir (Figure 9). Les fréquences élevées sont synchrones en 2000 et 2007 chez l'ensemble des types de cernes, sur toute la longueur du transect.

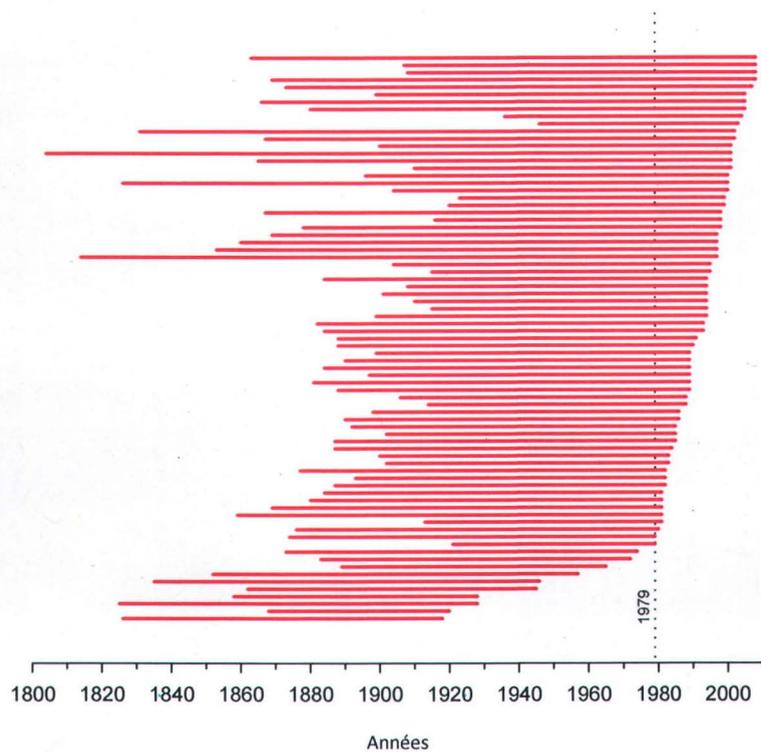


Figure 8. Période de vie des 103 individus morts qui ont pu être datés. Le taux de mortalité a augmenté à partir de la mise en eau du réservoir, en 1979.

4.3.1. Cernes incomplets

Les années de haute fréquence des cernes incomplets sont 1930, 1947, 1981, 2000, 2007, 2008 (Figure 10). Ils sont les plus abondants en zone II et leur nombre diminue en s'éloignant du rivage. Une hausse du nombre de cernes incomplets depuis la mise en eau a été notée sur l'île aux Punaises, au sud-ouest du réservoir (Tremblay et Bégin, 2005). Cette augmentation n'a pas été observée sur l'île aux Drumlins, au nord-ouest, bien que les années les plus sévèrement marquées soient 1981 et 1990 (Labrecque, 2000).

4.3.2. Cernes pâles

Le nombre de cernes pâles enregistré a augmenté depuis la mise en eau et plus fortement encore depuis la décennie 1990 (Figure 11). Ils sont principalement

présents en 1893, 1906, 1914, 1921, 1947, 1967, 1990, 1993, 1995, 1996, 1998, 1999, 2000, 2002, 2004 et 2007. On note une quasi absence de cernes pâles en 1997, 2001, 2005, 2006 et 2008. Comme c'est le cas pour les cernes incomplets, leur abondance est maximale en zone II et décroît dans les zones III et IV. L'étude menée en 1996 sur l'ensemble du réservoir Robert-Bourassa n'a pas relevé de hausse du nombre de cernes pâles depuis 1979 (Bégin et al., 1998; Kinnard et al., 1998). À noter que notre chronologie est asynchrone avec la chronologie de référence pour le Québec nordique (Filion et al., 1986; Delwaide et al., 1991), qui ne s'étend cependant pas au-delà de 1978. Seules les années 1947 et 1967 se recoupent.

4.3.3. Cernes traumatiques

Les cernes traumatiques comprennent un nombre anormalement grand de canaux résinifères (*traumatic resin ducts*). Les années de hautes fréquences d'enregistrement succèdent la mise en eau du réservoir : 1986, 2000, 2002, 2004, 2005, 2006 et 2007 (Figure 12). Les cernes traumatiques sont particulièrement nombreux dans les zones I et II. De façon générale, leur nombre diminue en se rapprochant de l'intérieur de l'île. Dans les zones II et III, aucun enregistrement n'a été relevé avant l'année charnière 1979. Cette hausse du nombre de cernes traumatiques correspond à ce qui a été observé sur les autres îles du réservoir (Bégin et al., 1998; Tremblay et Bégin, 2005).

4.3.4. Bois de réaction

La surproduction de lignine se concentre à l'aval du plan d'inclinaison et donc du vent. Le bois de réaction est omniprésent dans les cernes produits après la mise en eau du réservoir (Figure 13). Les séquences de bois de réaction sont souvent continues entre 1980 et 2008. La fréquence d'enregistrement augmente simultanément en 1980 à l'intérieur des quatre zones. Sur l'ensemble du transect, elle augmente de 25% en 1979 à 75% dès 1983. Les cernes contenant du bois de réaction sont entre 10% et 20% plus nombreux dans la zone II, où ils étaient

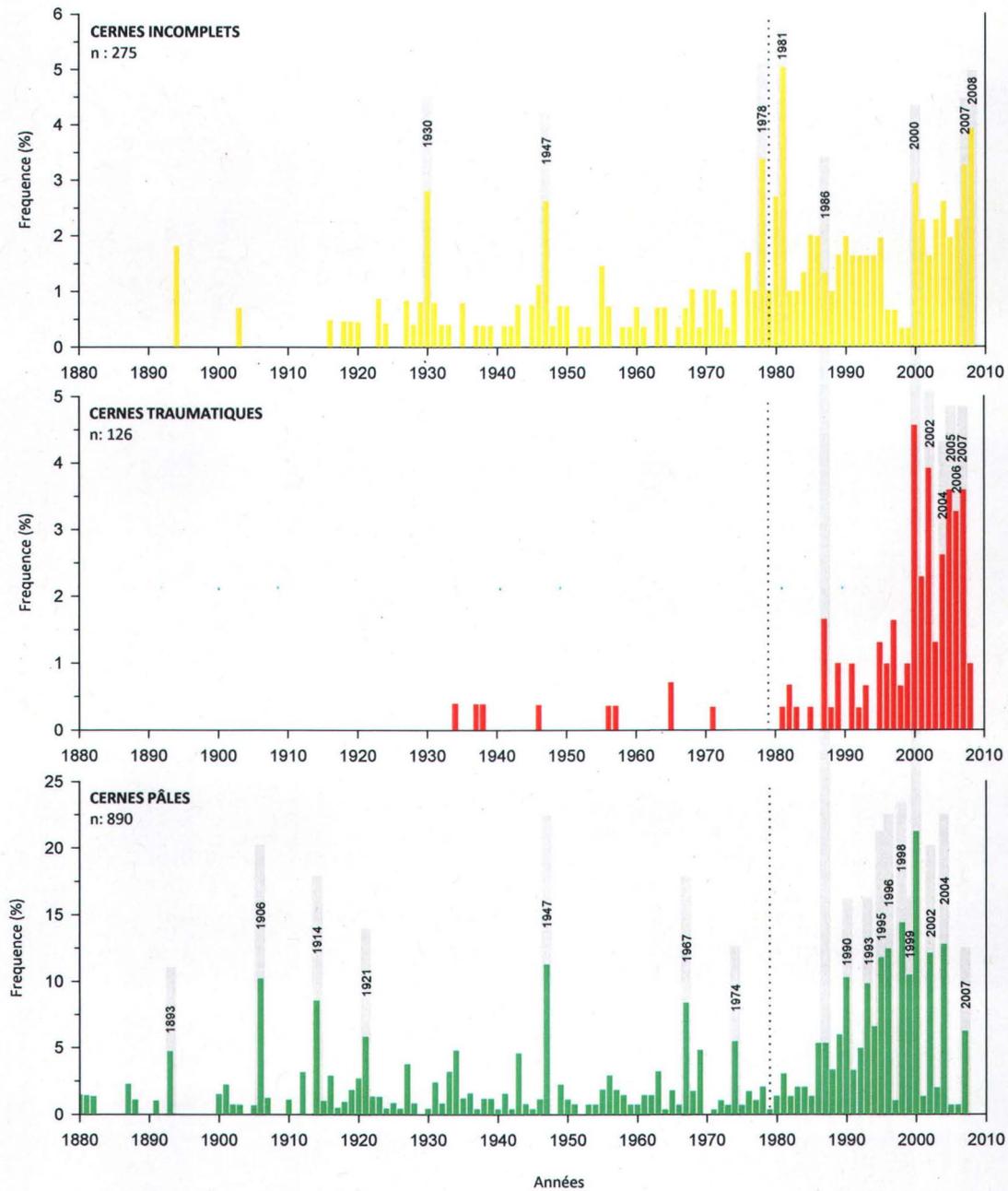


Figure 9. Enregistrements des cernes diagnostiques sur l'ensemble du transect. Les fréquences relatives sont ajustées en fonction du nombre de cernes de croissance disponibles pour chaque année.

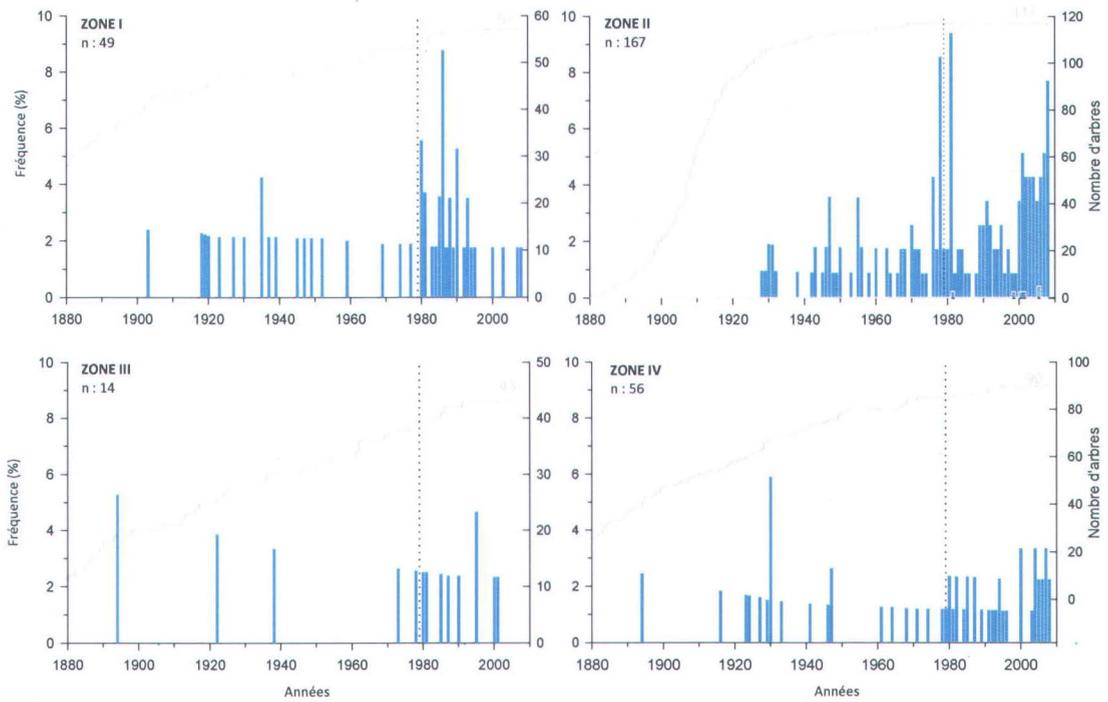


Figure 10. Fréquences relatives des cernes incomplets à l'intérieur de chaque zone.

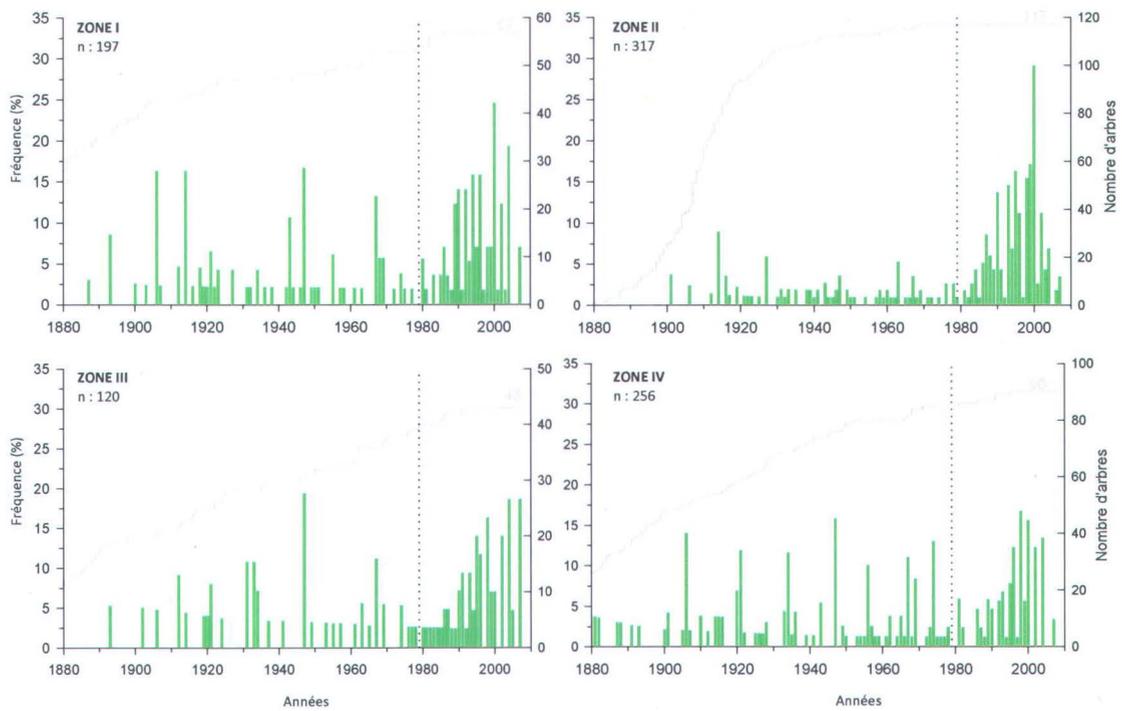


Figure 11. Fréquences relatives des enregistrements de cernes pâles à l'intérieur de chaque zone.

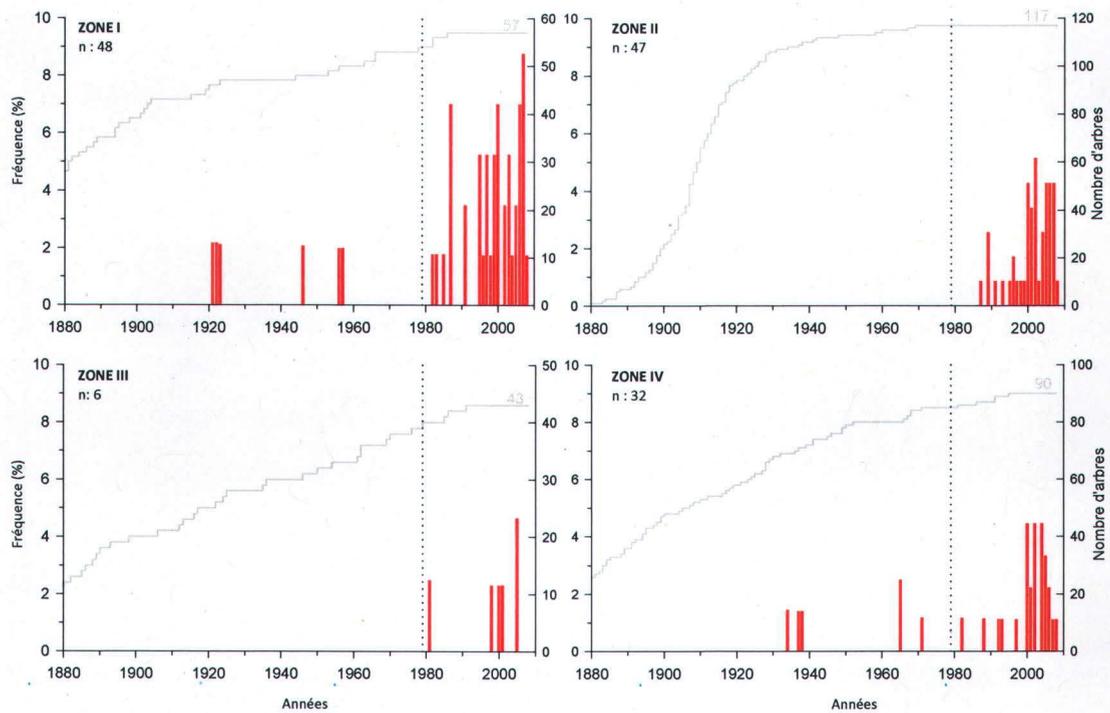


Figure 12. Fréquences relatives des enregistrements de cernes traumatiques à l'intérieur de chaque zone.

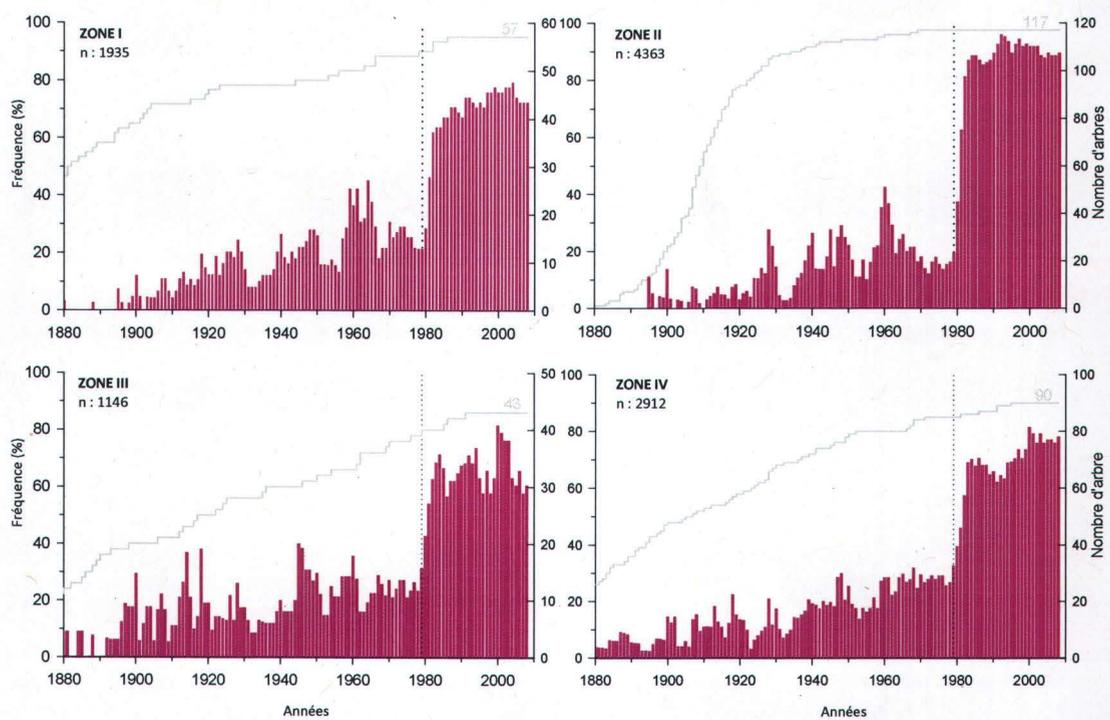


Figure 13. Fréquences d'enregistrement de bois de réaction pour chaque zone du transect.

pourtant légèrement moins fréquents avant la mise en eau. La formation de bois de réaction a aussi augmenté de façon importante depuis 1979 sur les autres îles du réservoir (Bégin et al., 1998; Labrecque, 2000; Allaire, 2004; Tremblay et Bégin, 2005).

4.4. Croissance

La croissance des arbres à l'île aux Neiges est comparable à celle de l'île du Feu, à 4 km à l'est. Elle est au dessus de la moyenne régionale (RCS) avant 1980. La croissance des arbres sur la rive sud-ouest de l'île aux Neiges est en deçà de celle du reste de l'île, de la moyenne régionale et des autres îles, durant toute la période qui précède la mise en eau du réservoir. C'est particulièrement vrai de 1920 à 1980. Deux ans après la mise en eau, les arbres indiquent une détente de croissance majeure. La courbe de croissance standardisée (Figure 14) grimpe au-dessus de la moyenne régionale seulement à partir de 1995.

Sur chacune des îles, on note une baisse de croissance en 1980 et 1981, ainsi qu'en 1989. Cependant, la détente de croissance enregistrée par la forêt riveraine de l'île aux Neiges n'apparaît pas toujours aussi franchement ailleurs. À noter qu'aucune donnée n'est disponible au-delà de 1995 sur les autres îles, alors que c'est précisément à partir de cette année que la croissance est maximale à l'île aux Neiges.

La courbe de croissance moyenne construite à partir des rayons tracés à l'aval du plan d'inclinaison (dans le bois de réaction) a été comparée à celle des rayons en amont (Figure 15). Il apparaît que la poussée de croissance qu'ont subie les arbres de l'île aux Neiges depuis 1982 est en grande partie attribuable à une stratégie de stabilisation des tiges déséquilibrées. Cependant, la courbe des rayons en amont du plan d'inclinaison indique aussi une détente de croissance depuis 1982. La détente de croissance n'est donc pas uniquement attribuable à la présence de bois de réaction. Les arbres des zones I et II sont ceux où l'augmentation de la croissance est

la plus marquée. C'est précisément dans ces zones que l'ouverture du paysage est maximale.

À l'intérieur du transect, avant la mise en eau du réservoir, la croissance était généralement plus faible en zone II et plus forte en zone IV, les zones I et III se situant entre les deux. L'humidité du sol, trop élevée à certains endroits, à d'autres, complètement absente, semble être à l'origine de ces écarts. Depuis la mise en eau, les arbres de la zone I ont rejoint le rythme de croissance de ceux de la zone IV. Parallèlement, la croissance en zone II atteint celle de la zone III, dont la détente de croissance est la plus ténue du transect.

4.5. Dommages aux arbres

Des 405 individus vivants en 2008 recensés à l'intérieur du transect, 23,70% laissait paraître au moins un indicateur de traumatisme. Au total, 187 dommages ont été observés sur 96 individus différents. Les 95 dommages échantillonnés comprennent 63 cicatrices d'arrachement de branche, 22 ploiements et 10 bris de tige (Figure 16). Seulement 3 d'entre eux, tous des cicatrices, sont survenus avant 1979. Suite à la mise en eau, on note une absence de dommage dans l'ensemble du transect seulement en 1979, 1980, 1987, 2007 et 2008. Les périodes 1988-1992 et 1998-2003 ont été particulièrement perturbées. C'est en 2000 et 2002 que le plus d'individus différents ont été endommagés.

La grande majorité (73%) des dommages mécaniques sont survenus en zone II, alors que seulement 8 ont été relevés en zone IV (Tableau 5). Les arbres arborant le plus de dommages par tige sont situés en zone II (Figure 17), et c'est aussi là, ainsi qu'en zone I, que leur hauteur est maximale (Figure 18).

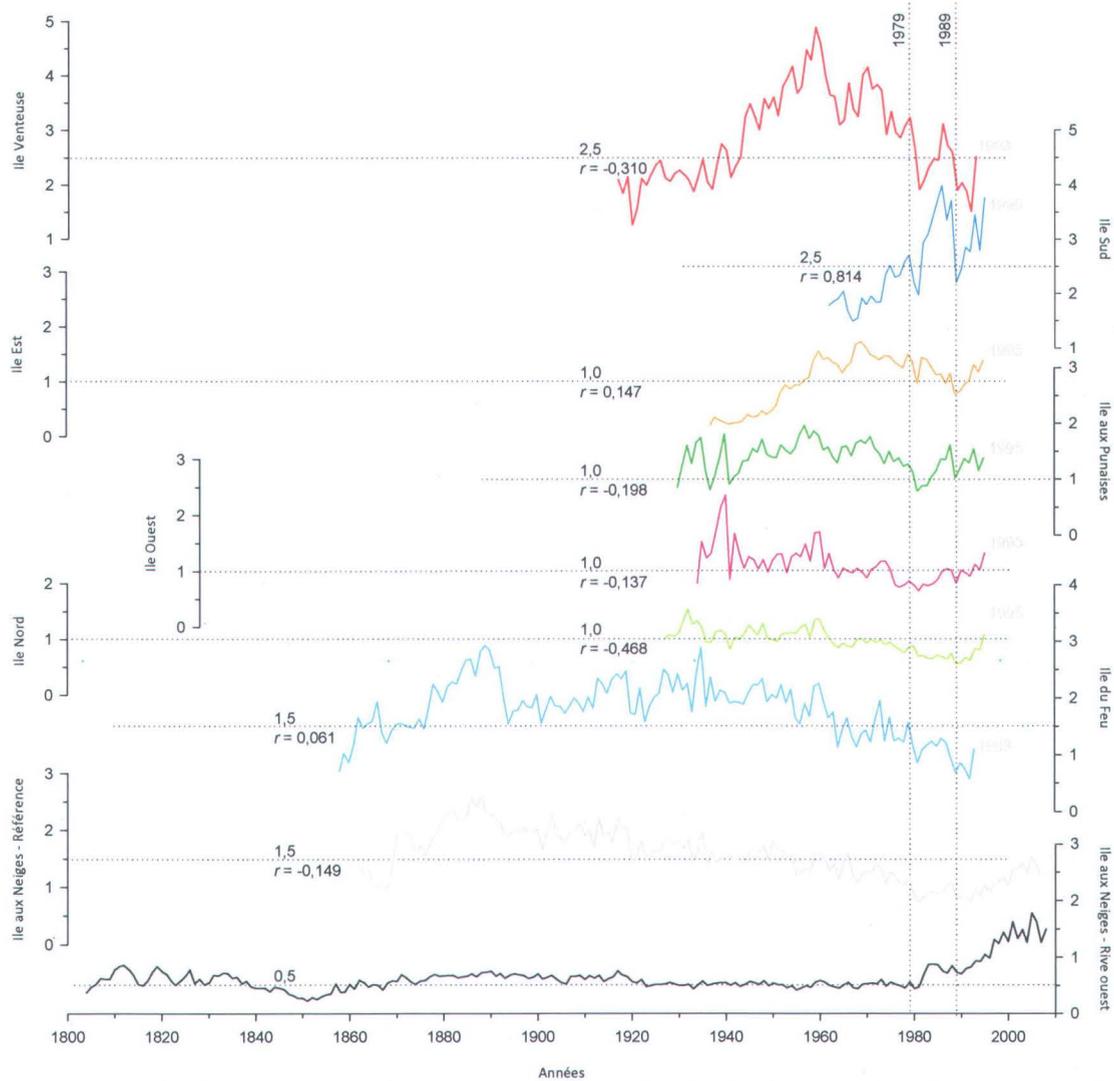


Figure 14. Courbes de croissance standardisées des rives ouest de 8 îles du réservoir Robert-Bourassa et courbe de croissance de référence de l'île aux Neiges. Toutes les courbes ont été standardisées à l'aide de la même RCS. La croissance sur l'île aux Neiges est en dessous de la moyenne régionale (=1) sauf à partir de 1995. Celles des îles Nord, Ouest et Est varient autour de la moyenne, alors que sur les îles du Feu, aux Punaises, Sud et Venteuse, la croissance est généralement meilleure qu'ailleurs dans la région. Les corrélations entre les courbes de croissance des îles et celle de la rive ouest de l'île aux Neiges ont été indiquées. Les lignes pointillées horizontales et le nombre au-dessus de chacune d'elles indiquent un ordre de grandeur de la croissance.

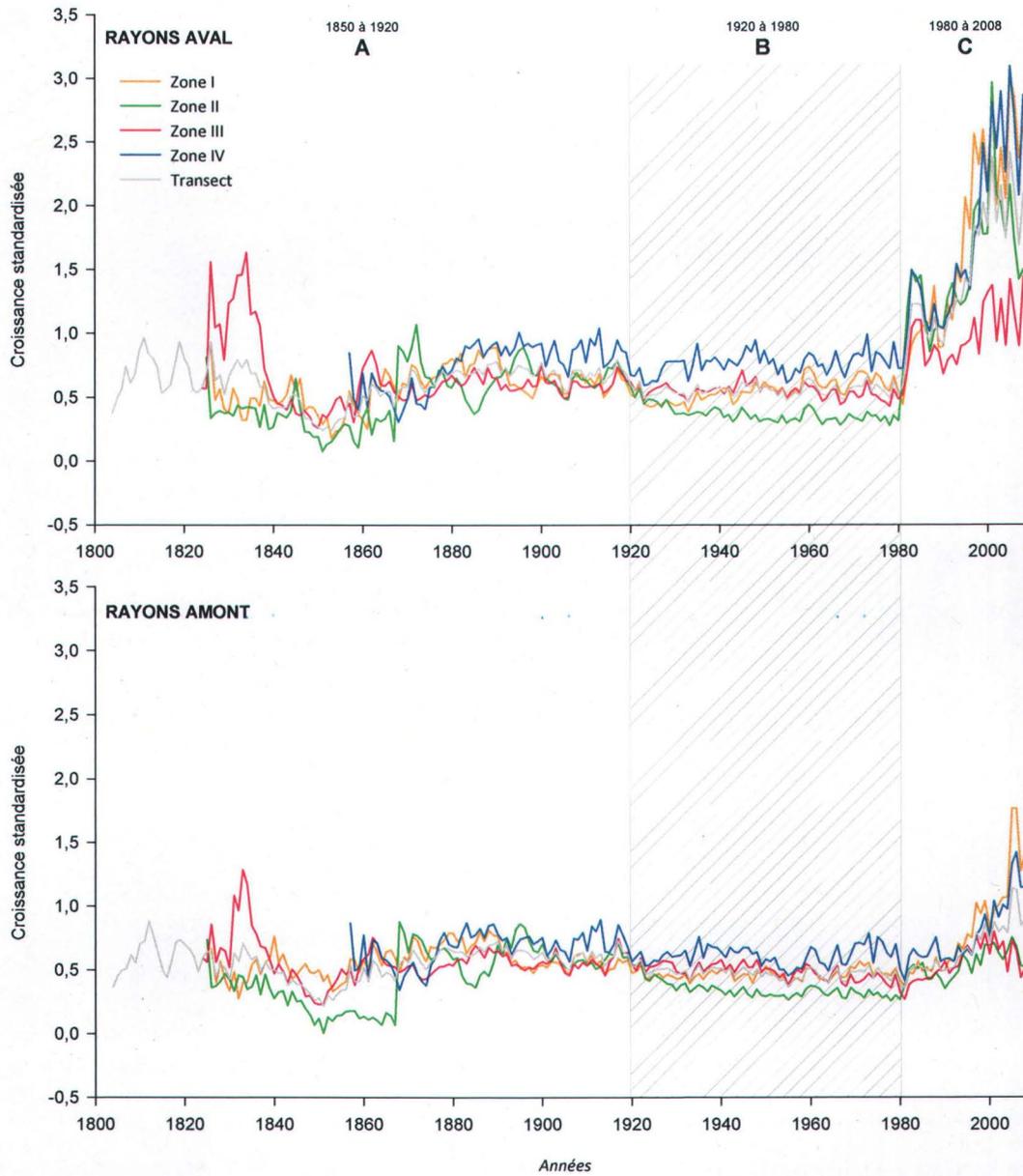


Figure 15. Courbes de croissance standardisées construites à partir de rayons tracés en aval (haut) et en amont du plan d'inclinaison (bas). Les données de chaque zone ont été compilées séparément. Le bois de réaction est en grande partie responsable de l'augmentation de la croissance sur l'île aux Neiges, particulièrement en zone II.

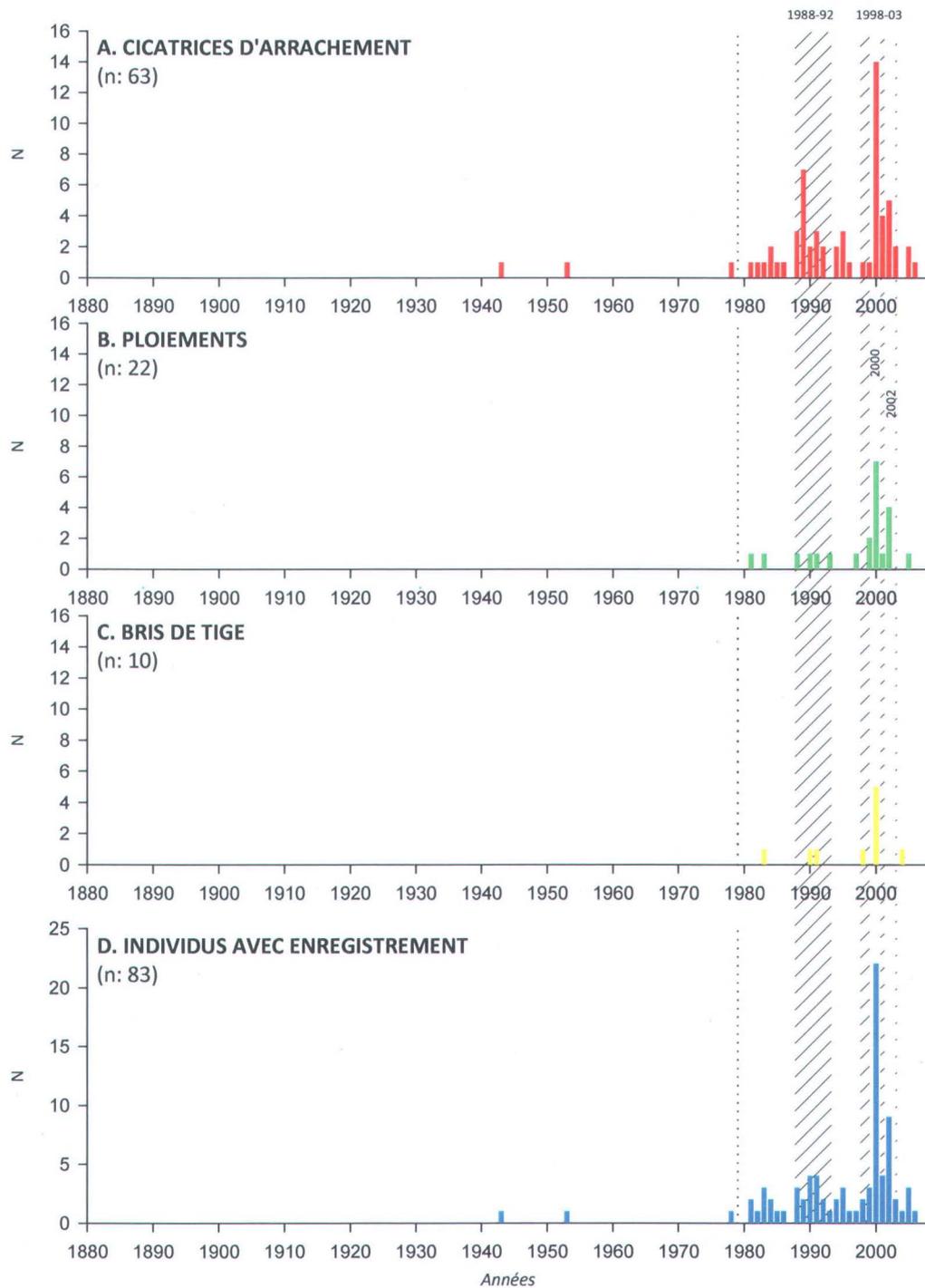


Figure 16. Nombre de cicatrices d'arrachement de branche (A), ploiements (B) et bris de tige (C) recensés à l'intérieur du transect. Pour chaque année, le nombre d'individus ayant enregistré au moins un dommage est indiqué (D). Les périodes 1988-1992 (I) et 1998-2003 (II), et plus spécialement 2000 et 2002, ont particulièrement marqué les arbres. Seuls 3 dommages datent d'avant la mise en eau du réservoir (1979).

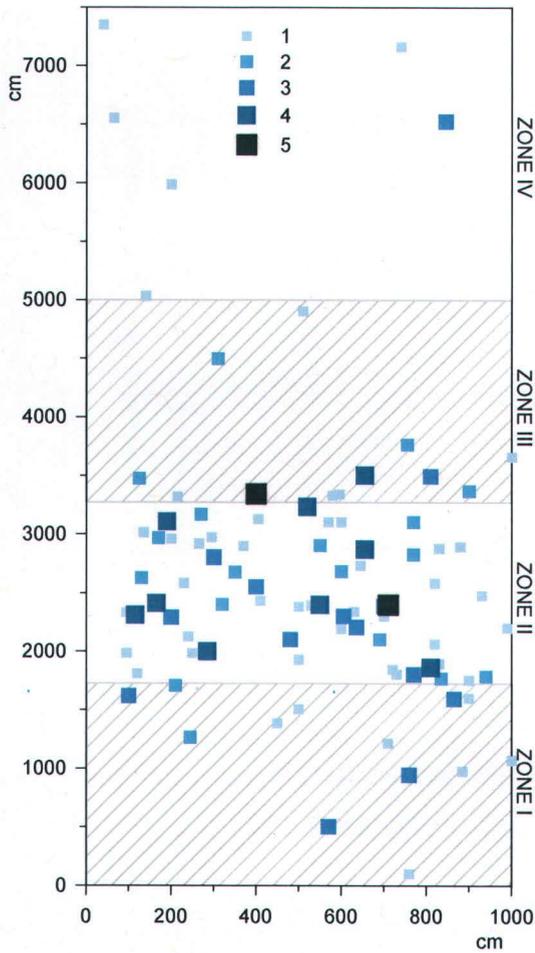


Figure 18. Nombre de dommages recensés sur chaque arbre. Ils sont en plus grande concentration en zone II.

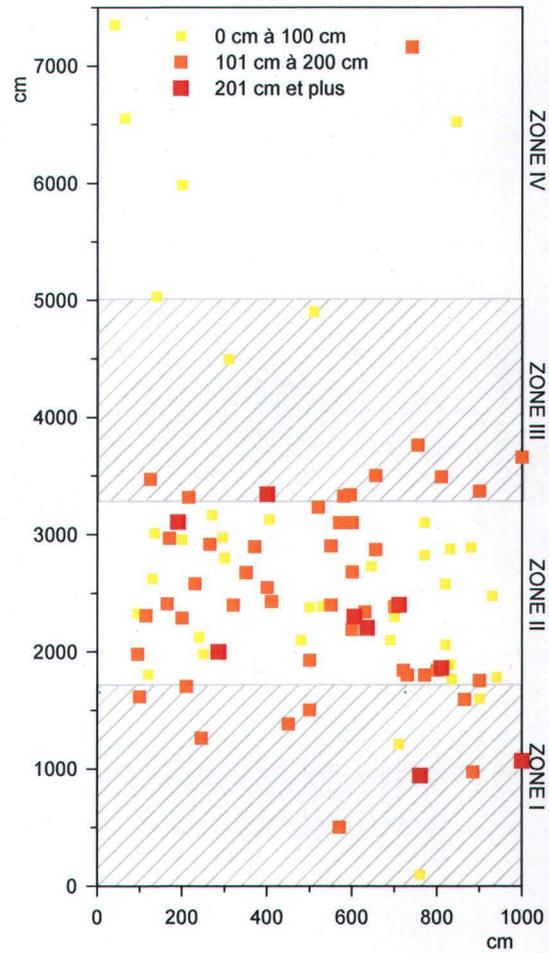


Figure 17. Hauteur du plus haut dommage recensé sur chaque arbre. Les plus élevés se trouvent en zones I et II.

Tableau 5. Proportion de la totalité des dommages recensés à l'intérieur de chaque zone. Deux individus ayant enregistré un total de quatre dommages n'ont pas été intégrés à cette analyse en raison d'une erreur sur leur positionnement.

Zones	N	Proportions
I	23	13,0%
II	129	73,0%
III	17	9,5%
IV	8	4,5%

4.6. Enregistrements climatiques

Les données climatiques de la station météorologique LGA sont disponibles pour les années 1976 à 2004 (Tableau 6). Au cours de cette période, l'année la plus froide a

été 1989 et, la plus chaude, 1998. L'année 1989 a également connu l'hiver (décembre, janvier, février) le plus froid et l'année la plus sèche, notamment suite à un été (juin, juillet, août) ayant reçu peu de pluies. C'est en 1999 que les précipitations annuelles ont été les plus importantes; les hivers de 1999 et 2000 ont été les plus enneigés.

Tableau 6. Températures et précipitations saisonnières à la station météorologique LGA, 1976 à 2004 (Environnement Canada). Les mois d'hiver sont décembre, janvier et février; les mois d'été sont juin, juillet et août. Lorsque la valeur d'au moins un mois était manquante, la mention « dm » (données manquantes) était attribuée.

Années	Température (°C)			Précipitation (mm équivalent en eau)			
	Hiver	Été	Moyenne annuelle	Hiver	Été	Total annuel	Moyenne mensuelle
1976	dm	dm	dm	dm	dm	dm	dm
1977	-19,87	10,68	-2,63	35,73	96,87	712,10	59,34
1978	-20,45	10,47	-4,52	15,50	91,23	646,10	53,84
1979	dm	dm	dm	dm	dm	dm	dm
1980	-21,96	12,09	-3,70	29,30	69,10	742,50	61,88
1981	-16,73	13,05	-1,79	33,43	73,40	681,60	56,80
1982	-22,75	10,62	-4,39	42,60	93,30	785,90	65,49
1983	-21,00	12,73	-2,96	29,43	83,50	777,40	64,78
1984	-20,85	11,78	-3,10	31,63	72,20	657,90	54,83
1985	-21,74	12,23	-3,74	22,17	72,10	630,10	52,51
1986	-20,30	10,85	-4,06	28,70	94,67	647,60	53,97
1987	-16,85	11,40	-1,85	30,53	91,13	747,80	62,32
1988	-22,56	12,59	-3,03	37,10	55,07	686,50	57,21
1989	-24,22	12,02	-4,90	30,27	37,87	532,70	44,39
1990	-22,14	12,30	-3,98	36,13	85,53	738,00	61,50
1991	-22,60	13,43	-3,40	30,87	dm	dm	dm
1992	-21,63	10,65	-4,70	30,00	70,33	771,80	64,32
1993	-21,33	14,10	-3,50	29,00	59,93	654,60	54,55
1994	-21,94	12,19	-3,41	28,80	65,67	567,40	47,28
1995	-19,62	13,72	-2,57	19,93	69,60	648,60	54,05
1996	-20,48	13,89	-2,82	58,97	66,47	641,60	53,47
1997	-19,86	13,31	-3,12	27,07	49,07	577,20	48,10
1998	-16,76	14,64	-0,38	31,33	64,33	587,40	48,95
1999	-16,00	13,33	-0,50	43,20	109,20	852,80	71,07
2000	-19,41	12,34	-2,11	24,27	112,83	715,70	59,64
2001	-17,36	13,78	-0,63	40,60	84,93	829,20	69,10
2002	dm	13,24	dm	dm	75,33	dm	dm
2003	-19,69	13,12	-2,61	27,93	63,47	559,00	46,58
2004	dm	11,25	dm	dm	99,40	dm	dm

5. Discussion

5.1. Historique du peuplement

5.1.1. Période A : 1850 à 1920

La période A débute avec la reforestation post-feu et s'arrête avec la baisse de croissance engendrée par l'entourbement de la rive sud-ouest. Le peuplement forestier actuel de l'île aux Neiges² s'est installé sur cet ancien sommet de colline suite au passage du dernier feu autour de 1850. En l'espace de 80 ans (1852-1950), 84% des arbres recensés à l'intérieur du transect se sont installés. Malgré un sol mince, la croissance est bonne dans l'ensemble du peuplement, sauf sur le flanc ouest de la colline. Elle est supérieure à la croissance moyenne régionale et se compare à celle du sommet voisin, qui deviendra l'île du Feu. Cependant, sur le flanc ouest, la croissance est environ 50% plus faible que la moyenne régionale. Cela peut s'expliquer en partie par le fait que, pour construire les courbes de croissance de référence (celles des îles et celles ayant servi au calcul de la RCS), seuls les arbres de grande taille ont été échantillonnés. Puisque l'objectif était d'établir une courbe de croissance reculant le plus loin possible dans le temps, les arbres les plus âgés présentaient un plus grand intérêt. Or, en l'absence d'information sur l'âge des arbres, la taille demeurait un bon indicateur de longévité. Lors de notre échantillonnage sur la rive ouest de l'île aux Neiges, toutes les épinettes noires de plus de 1 m, indistinctement de leur taille, ont été retenues. Néanmoins, aucune d'entre elles ne possédait un diamètre imposant lors de la coupe. On peut donc en déduire, en dépit des biais à l'intérieur des courbes de référence, que les conditions de croissance de ce côté de l'île n'ont jamais été favorables à la croissance. Les conditions édaphiques difficiles auraient gêné le développement des arbres. Le sol est mince et le roc affleure à quelques endroits. De plus, la présence de légères dépressions dans la roche mère empêche l'eau d'être évacuée librement. Les

² Comme les îles du réservoir étaient des collines avant la mise en eau, nous référerons aux îles comme des collines et aux rives comme des flancs de colline pour les périodes A et B.

vents soufflant sur le flanc ouest de l'ancienne colline auraient également entraîné d'importantes pertes foliaires réduisant la capacité photosynthétique des arbres et donc leur potentiel de croissance. Les peuplements du sommet de certaines collines du haut boréal présentent ainsi des formes épluchées.

Aucun indicateur autre que la croissance radiale ne témoigne de conditions de croissance inhospitalières. L'année de mort d'aucun arbre ne date d'avant 1920, bien que ceux qui sont peut-être morts à cette époque se sont probablement décomposés depuis. Aucun dommage mécanique n'a été daté d'avant 1920. Si certains existaient, ils ont été occultés par l'accrétion de bois. Très peu de cernes diagnostiques ont été relevés. Les années 1893, 1906 et 1914 présentent de hautes fréquences d'enregistrement de cernes pâles chez les arbres du côté ouest de la colline. Le petit nombre de cernes pâles indique que les températures estivales durant la période A ont généralement été favorables à la croissance (Filion et al., 1986; Yamaguchi et al., 1993). Finalement, aucun cerne traumatique et très peu de cernes incomplets (6) ont été relevés. Ces deux types de cernes se forment lors d'événements stressants, notamment les attaques épidémiques d'insectes réduisant les capacités photosynthétiques d'un arbre (Krause et Morin, 1995; Filion et al., 1998; Lemieux et Filion, 2004). Bégin et al. (1998) ont émis l'hypothèse que les cernes traumatiques pouvaient être associés à des années d'intense défoliation par le vent et la neige. Cela exclurait donc le vent comme facteur limitant la croissance sur le flanc ouest de la colline. Les caractéristiques du sol expliqueraient à elles seules la faible croissance à cet endroit. On peut conclure qu'il n'y a eu aucun événement stressant au cours de la période A, bien que le milieu rendait la croissance ardue.

5.1.2. Période B : 1920 à 1979

La période B constitue une période de croissance difficile attribuable à la surabondance d'eau piégée par la tourbe. À partir de 1920, on note une baisse marquée de la croissance sur l'ensemble de la colline. Elle est plus importante en

zone II alors que les arbres de la zone IV n'ont connu qu'une faible modification de leur régime de croissance. Cette chute de croissance a été notée chez le peuplement de la colline voisine (île du Feu) mais à aucun autre endroit dans la région. La présence actuelle de tourbe sur la rive ouest de l'île aux Neiges laisse croire que le milieu est susceptible de retenir aisément l'eau. L'humidification des milieux, voire leur entourbement graduel, pourrait expliquer la baisse du régime de croissance. Elle pourrait également être attribuable à l'atteinte de la zone de déflation supranivale par la cohorte post-feu (Payette, 1974; Lavoie et Payette, 1992; Boivin et Bégin, 1997). Cependant, l'absence de formes de croissance témoignant de dommages reliés à cette période d'exposition critique suppose que ce facteur est négligeable à l'île aux Neiges.

C'est au cours de la période B qu'apparaissent certaines des zones observées lors de notre étude sur la rive ouest de l'île aux Neiges. Les zones II et IV se différencient par leur croissance du reste du transect. La zone II correspondant à une dépression du socle rocheux, l'entourbement encouragé par l'emprisonnement de l'eau à cet endroit serait la cause du ralentissement de croissance. La zone IV se trouvant sur une pente légèrement plus prononcée et un sol potentiellement plus profond, le drainage y aurait été suffisamment efficace pour que les arbres ne ressentent pas les effets de l'humidification du milieu.

Huit arbres sont morts au cours de cette période. Quelques cicatrices d'arrachement de branche (3) sont également antérieures à 1979. La dégradation du bois mort et la disparition des cicatrices sous de nouveaux cernes de croissance peuvent avoir biaisé la récolte de données, quoique cela est moins vrai plus on se rapproche de 2008. La fréquence d'enregistrement de cernes pâles a pour sa part fortement augmenté en zone II et légèrement en zone I et IV. Des conditions de croissance plus rudes en seraient la cause. L'augmentation de nombre de cernes de croissance incomplets relevés chez les arbres de toutes les zones confirme cette hypothèse. La quasi absence de cernes traumatiques vient de nouveau éliminer la

défoliation comme facteur pouvant expliquer la baisse de croissance. L'humidification et la palludification du milieu en sont les seuls responsables.

5.1.3. Période C : 1979 à aujourd'hui

La période C est celle de la détente de croissance qui succède la création du réservoir Robert-Bourassa. Celle-ci a modifié la dynamique nivéoéolienne. Le vent et la neige sont devenus des agents perturbateurs qui ayant causé la mort de 14,5% de la population de la rive ouest en une trentaine d'années. L'ouverture du paysage qui en a résulté a été bénéfique pour la croissance des arbres puisqu'il y a a) diminution de la compétition pour les nutriments et b) assèchement progressif du milieu par évaporation. Ces phénomènes sont d'intensités inégales sur la rive. L'ouverture du paysage est plus importante chez les premières franges forestières faisant barrière au vent. Quant à l'assèchement du sol, il dépend du microrelief. Les plaques de tourbe qui se sont installées dans les dépressions les plus profondes limitent en partie l'évaporation de l'eau. De plus, l'augmentation des niveaux de neige engendre plus d'eau de fonte au printemps. Cette eau s'écoule vers ces dépressions en plus grande quantité qu'avant 1979.

La conséquence sur la croissance n'a pas été immédiate. Les modifications des conditions de croissance ont perturbé les arbres, qui ont enregistré une baisse de croissance durant les 3 années suivant la mise en eau (1979-1981). Les pertes foliaires et la déstabilisation des arbres sont certainement des facteurs qui ont freiné la croissance au cours des premières années. Dès 1982, on note une détente de croissance marquée partout sur l'île aux Neiges et sur les autres îles du réservoir, à l'exception de l'île Nord. En 1989, l'année la plus froide et sèche entre 1976 et 2004, l'ensemble des peuplements insulaires du réservoir connaît une chute importante de croissance. À l'intérieur du transect d'échantillonnage de l'île aux Neiges, c'est l'année la plus meurtrière, avec 1994, alors que 6 arbres sont morts. Rapidement, la croissance a repris sur l'ensemble du réservoir avant de connaître

une nouvelle détente en 1995 à l'île au Neige. Nous ne possédons aucune donnée de croissance sur les autres îles après 1995.

La poussée de croissance survenue après la mise en eau s'est faite principalement sentir dans les zones I et IV. En zone II, le milieu est demeuré humide et en zone III, le sol est trop mince. En ne considérant que l'accroissement radial mesuré à l'intérieur du bois de réaction (Figure 15), la détente de croissance est non seulement visible en zone II mais, elle rejoint les niveaux des arbres des zones I et IV. Les arbres à l'intérieur de la zone II ont donc été fortement déstabilisés. Par ailleurs, les courbes de croissance des quatre zones indiquent que l'ensemble du peuplement forestier de la rive ouest a subi l'effet déstabilisant du vent et de la neige.

L'omniprésence du bois de réaction et des dommages mécaniques en zone II démontre que les niveaux de neige sont plus importants à cet endroit. Tout comme c'était le cas sur l'île Tombolo au lac Bienville (Boivin et Bégin, 1997) et sur l'île aux Punaises (Tremblay, 1999), le peuplement riverain a été sculpté par la dynamique nivéoéolienne. Le patron de distribution est divisé en trois zones. La première frange d'arbres (zone I) crée un effet de barrière au vent mais accumule peu de neige. Les cristaux les plus lourds sont déposés quelques mètres plus loin, créant une congère de plusieurs mètres (zone II). À l'île aux Neiges, la captation de la neige à cet endroit est facilitée par une légère dépression dans la topographie du rivage. Les cristaux de neige les plus légers atteignent la forêt fermée (zone IV), où ils se déposent sur les branches. La zone III constitue une zone de transition dans le patron de distribution de la neige. Le faible nombre de dommages mécaniques y ayant été recensés suggère que les niveaux de neige et la densité du couvert nival n'y sont pas spécialement importants.

On note une hausse marquée du nombre de dommages mécaniques au cours de la période C. C'est particulièrement vrai pour l'année 2000, qui a connu, avec 1999, l'hiver le plus enneigé entre 1976 et 2004. Plus de cicatrices d'arrachement de

branche ont été dénombrées que de bris et de ploiments de tige. Les branches sont plus faciles à casser en raison de leur diamètre souvent inférieur à celui de la tige. De plus, ce sont elles qui supportent directement le poids de la neige captée par les arbres. Le nombre de cernes diagnostiques a augmenté depuis 1979. La succession de fortes années d'enregistrement de cernes pâles depuis la mise en eau suggère que le réservoir a un effet thermique négatif sur les températures estivales locales. Gagnon (2000) avait également noté un refroidissement des températures durant l'été depuis 1979. L'impact thermique du réservoir semble s'être accentué depuis les années 1990, à en juger par l'accroissement du nombre de cernes pâles relevés. L'abondance de cernes traumatiques a augmenté, surtout en zone I, où les pertes foliaires ont été importantes. Les cernes de croissance incomplets sont eux aussi plus nombreux depuis la création du réservoir, particulièrement en zone II, où les conditions de croissance sont stressantes. Une hausse de l'occurrence des cernes traumatiques et incomplets a également été mesurée sur d'autres îles du réservoir (Bégin et al., 1998; Kinnard et al., 1998).

5.2. Formes de croissance

À l'île aux Neiges, les chionoturbations ont engendré de nombreuses formes de croissance. Toutefois, elles n'expriment pas un gradient de déflation nivale mais plutôt un gradient de pression exercée par la force du vent et le poids de la neige (Figure 19). Bien que certaines d'entre elles aient été discutées auparavant (Morin et Payette, 1986; Boivin et Bégin, 1997, Labrecque, 2000, Allaire, 2004), elles n'ont jamais, à notre connaissance, été interprétées en fonction de ce gradient. Nous nous proposons ici de le faire.

5.2.1. Courbé

Sous le poids du vent et de la neige, l'arbre dévie de sa position verticale. Il parvient à retrouver son équilibre géotropique grâce au bois de réaction (Scurfield, 1973). Il y parvient grâce à la surlignification de ses parois cellulaires d'un seul côté du plan

d'inclinaison. Le rapport de force inégal entre les deux côtés de la tige crée un nouvel équilibre. La cime poursuit son développement orthotrope. Une courbe est ainsi formée le long de la tige. Chez les gymnospermes, la lignification survient en aval du plan d'inclinaison et engendre la stabilisation par une expansion des cellules. Chez les angiospermes, c'est par la contraction des cellules en amont du plan d'inclinaison que l'équilibre est retrouvé (Scurfield, 1973).

La modification architecturale de l'arbre provient de la suramification de sa partie apicale engendrée par la perte de la position verticale. Elle permet à l'individu d'augmenter son potentiel photosynthétique afin de pallier à ses nouveaux besoins en énergie. Il peut être difficile de différencier ces rameaux de ceux créés lors du développement normal de l'arbre. Dans les deux cas, il s'agit de réitérats adaptatifs.

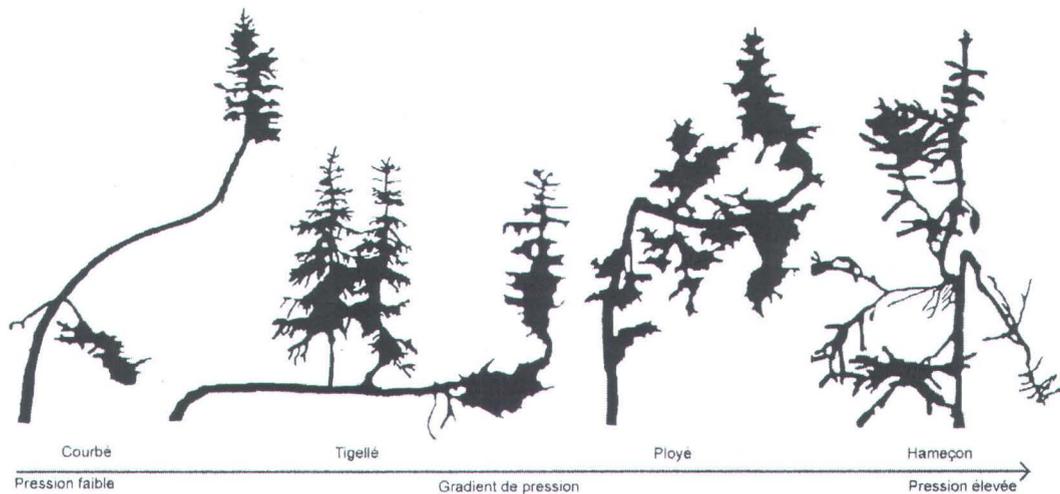


Figure 19. Formes de croissance exprimant le gradient de pression nivéoéolienne.

5.2.2. Tigellé

Lorsqu'une tige est trop fortement inclinée, une ou plusieurs de ses branches ou de ses bourgeons latents se développent en tigelles à croissance verticale. L'une d'elle peut éventuellement prendre le pouvoir apical et devenir la tige principale, bien que ce ne soit pas toujours le cas (Schweingruber, 1988). Par la transformation d'un axe

existant ou l'éclosion d'un bourgeon latent, l'architecture de l'arbre est modifiée. Les tigelles au-delà de celle ayant repris le relais apical sont appelées à disparaître. La distribution des ressources se fait à la faveur du nouveau tronc et les axes ne se situant pas entre le système racinaire et lui s'appauvrissent et meurent. Cette forme de croissance est donc temporaire.

5.2.3. Ployé

Lorsque le poids de la neige dépasse la capacité de charge d'une tige, les tissus se déchirent, entraînant un bris d'organe tel que décrit plus tôt. Si l'arbre parvient à assurer la survie de la section au-dessus de la blessure, on le dira ployé (Morin et Payette, 1986). À l'emplacement du bri apparaît une cicatrice en forme de coude (cicatrice de ploiement) que l'on peut dater par dendrochronologie. Il est possible que la tige soit complètement repliée sur elle-même sans qu'une cassure ne survienne. L'absence de mortalité apicale assure la pérennité de l'intégrité architecturale de l'arbre. Par contre, comme c'était le cas chez la forme courbée, le ploiement du tronc stimule la réitération adaptative des branches afin d'augmenter leur pouvoir photosynthétique.

Le déséquilibre engendré par la nouvelle position de la partie inclinée de la tige la force à se réaligner. La cime a tendance à se tordre de façon à replacer l'axe de croissance vertical le plus possible au-dessus du centre d'équilibre de l'arbre. La courbe qui en découle est souvent plus accentuée que celle des arbres à forme de croissance courbée en raison de l'angle aigu du ploiement.

5.2.4. Hameçon

Suite à un bris sévère, la tige peut se casser complètement. La dominance apicale doit alors être reprise par réitération proleptique. Un bourgeon latent positionné sur une branche déboussera en un axe vertical, créant une forme d'hameçon. Lorsque la cassure survient à l'apex, le remplacement de la tige principale se produit

par réitération syleptique. Les rameaux (verticilles) à proximité de la cime ayant une croissance orthotrope, elles peuvent réclamer la dominance apicale et se différencier en axe d'ordre 1 (Bégin, 1991a). Si plus d'un réitérats se développent autour de la tige, on parle d'une forme de croissance en verticille (Payette, 1974). La perte de dominance ne survient cependant pas suite à l'ablation du bourgeon apical par déflation nivale mais par la rupture d'une partie de la tige. La section morte peut rester accrochée à l'arbre durant plusieurs années avant de disparaître.

Selon le diamètre du tronc à la hauteur et au moment de la cassure, il peut y avoir une différence évidente entre la taille du réitérat et celle du tronc sous la blessure. Dans le cas contraire, l'angle qui uni les deux peut être occulté par l'accumulation de nouveau bois au point de n'être presque plus visible. Lorsque la tige est cassée à une bonne distance de la cime, la reprise apicale est généralement bien visible.

5.3. Perspectives d'évolution

5.3.1. Projection à court terme

La dynamique écologique qui régit le développement du peuplement riverain de l'île aux Neiges est semblable à celle que l'on retrouve dans les grands lacs nordiques (Boivin et Bégin, 1997). Puisqu'au réservoir Robert-Bourassa il s'agit d'un phénomène relativement nouveau, nous évaluerons l'impact qu'auront la neige et le vent sur le peuplement de l'île au Neige en s'inspirant de la situation du lac Bienville (Boivin et Bégin, 1997). L'ensemble des perturbations nivéoéoliennes, principalement les pertes foliaires en zone I et les bris de branches en zone II, entraîneront une chute de la capacité de rétention de la neige à l'intérieur des bordures forestières. Cela engendrera un déplacement du patron de distribution de la neige vers l'intérieur de l'île (zones III et IV). À l'île aux Neiges, ce recule serait probablement ralenti par les dépressions du socle rocheux et la pente de la rive. Plus exposés au vent et à la neige, les arbres de la zone IV en ressentiraient bientôt les effets (chionoturbations). La zone de suraccumulation neigeuse ne se trouvant

plus en zone II, les arbres y seront moins sujets à subir des dommages mécaniques. Par ailleurs, les épinettes les plus faibles ayant été éliminées les premières, de moins en moins d'arbres devraient périr. Les individus ayant une bonne capacité d'adaptation (i.e. réitérative) seront en mesure de remplacer leurs axes endommagés afin d'assurer leur survie.

5.3.2. Projection à long terme : état d'équilibre ?

Il est possible qu'un milieu perturbé comme celui des îles des grands lacs nordiques atteigne un équilibre écologique. Il faut cependant que les perturbations soient intégrées à la définition de celui-ci. L'historique du développement de la forêt de l'île Tombolo reconstruit par Boivin et Bégin (1997) et celui de l'île aux Neiges laissent croire à la possibilité d'un régime d'équilibre « en balancier » chez les forêts riveraines exposées aux conditions hivernales. Par les variations spatiales et temporelles de la capacité de rétention nivale de certaines franges d'un peuplement, la zone de suraccumulation se déplacerait de la rive vers l'intérieur de la forêt et vis-versa.

T_x : la bordure forestière (ZI) brise la course du vent et crée une zone de suraccumulation de neige (ZII).

T_{x+1} : le poids de la neige en ZII engendre des dommages mécaniques et le vent des pertes foliaires en ZI. Cela réduit le pouvoir de rétention nivale des premières franges d'arbres, entraînant un déplacement de la zone d'accumulation vers l'intérieur de l'île (ZIII).

T_{x+2} : les arbres en ZIII sont sujets aux chionoturbations. L'abaissement des niveaux de neige en ZII permet aux arbres de se développer normalement.

T_{x+3} : la capacité de rétention nivale en ZII ayant augmenté, le patron d'accumulation de neige se déplace à nouveau. Les arbres en ZIII sont en partie libérés de leur surcharge nivale, ce qui facilite leur développement. Retour à la situation T_x .

6. Conclusion

La création du réservoir Robert-Bourassa a engendré un milieu similaire à celui des grands lacs nordiques. Les îles piègent la neige de façon plus ou moins efficace en fonction de leur configuration, leur altitude, leur fetch dans le sens du vent, leur orientation et de la structure de leur forêt riveraine (Thom et Grandberg, 1970; Fillion et Payette, 1976; Morin et Payette, 1986; Fillion et Bégin, 1998; Tremblay, 1999). La neige et le vent engendrent une segmentation des peuplements insulaires riverains exposés aux vents dominants. Le découpage qui en découle est le résultat de différences marquées dans la croissance des arbres, le taux de mortalité et l'abondance et la hauteur de dommages mécaniques. Ces derniers sont liés à la surcharge nivale et engendrent des formes de croissance caractéristiques. Ces formes expriment un gradient d'intensité de pression nivéoéolienne plutôt qu'un gradient d'exposition au vent, comme c'est le cas pour les formes décrites par Payette (1974) et Lavoie et Payette (1992).

À l'époque où les îles du réservoir Robert-Bourassa étaient des sommets de colline, les épinettes connaissaient un accroissement radial plus rapide que la moyenne régionale. Ce n'était pas le cas sur la rive ouest de l'île aux Neiges, où la croissance était freinée par les propriétés du sol. La mise en eau s'est fait ressentir sur l'ensemble du réservoir. Sur les rives exposées au sud-ouest, la croissance radiale a chuté drastiquement. L'augmentation des enregistrements de cernes traumatiques et incomplets et du bois de réaction indiquent également un changement dans les conditions de croissance des milieux insulaires.

Sur une courte période de temps, l'atteinte d'un équilibre écologique statique semble impossible. Les chionoturbations majeures sont trop fréquentes pour permettre au milieu de se stabiliser. Par contre, à une échelle temporelle plus grande, ces perturbations sont intégrées à la dynamique de l'écosystème. Les variations de la capacité de rétention nivale des arbres, à l'intérieur de différentes

portions du peuplement riverain, créent un régime de balancier, où la zone de suraccumulation de neige se déplace.

Il serait intéressant de coupler les données climatiques enregistrées par les stations météorologiques du Centre d'études nordiques à des données dendrochronologiques *in-situ*. En reconstituant précisément le patron d'accumulation de neige, on pourrait comparer la hauteur et la densité de la neige avec la répartition des chionoturbations afin d'obtenir une évaluation précise de l'impact de la neige à l'échelle de quelques arbres. De tels résultats permettraient d'ajouter une nouvelle dimension aux études menées au réservoir Robert-Bourassa au cours des deux dernières décennies.

Références

- Allaire, J.F., 2004. Dynamique récente d'une bordure forestière sous l'effet de l'enneigement au réservoir Robert-Bourassa, Québec nordique. Mémoire de maîtrise, Université Laval, 71 pp.
- Arritt, R.W., 1987. The effect of water surface temperature on lake breezes and thermal internal boundary layers. *Boundary-Layer Meteorology* 40, 101-125.
- Baig, M.N. et Tranquillini, W., 1976. Studies on upper timberline : morphology and anatomy of Norway spruce (*Picea abies*) and stone pine (*Pinus cembra*) needles from various habitat conditions. *Canadian Journal of Botany* 54, 1622-1632.
- Baig, M.N. et Tranquillini, W., 1980. The effects of wind and temperature on cuticular transpiration of *Picea abies* and *Pinus cembra* and their significance in desiccation damage at alpine treeline. *Oecologia* 47, 252-256.
- Bailey W.G., Oke, T.R. et Rouse, W.R., 1997. The surface climates of Canada. McGill-Queen's University Press, Montréal et Kingston, 369 pp.
- Bégin, Y., Cournoyer, L., Tremblay, M., Tremblay, J., Simard, M., Boivin, S. et Lepage, H., 1998. In: Bégin, Y., Sirois, L., Cournoyer, L. et Frydecki, J. (Éd.), Analyse dendrochronologique des effets climatiques du réservoir Robert-Bourassa sur l'environnement forestier, Québec nordique. Rapport pour Hydro-Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, pp. 65-94.
- Bégin, Y., et Boivin, S., 2001. Tree-ring dating of past snow regimes. In : Jones, H.G., Pomeroy, J.W., Walker, D.A., et Hoham, R.W. (Éd.), *Snow Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 325-244.
- Bégin, C., 1991. Analyse architecturale et dendroécologique d'une pessière à lichens à la limite des forêts. Thèse de doctorat, Université Laval, 159 pp.
- Bégin, C. et Filion, L., 1999. Black spruce (*Picea mariana*) architecture. *Canadian Journal of Botany* 77, 664-672.
- Bégin, Y., 2001. Tree-ring dating of extreme lake levels at the subarctic-boreal interface. *Quaternary Research* 55, 133-139.

- Billings, W.D. et Bliss, L.C., 1959. An alpine snowbank environment and its effects of vegetation, plant development, and productivity. *Ecology* 40, 388-397.
- Boivin, S. et Bégin, Y., 1997. Development of a black spruce (*Picea mariana*) shoreline stand in relation to snow level variations at Lake Bienville in northern Québec. *Canadian Journal of Forest Research* 27, 295-303.
- Boudreault, D., 2000. Les effets de l'exposition sur la croissance de l'épinette en marge du réservoir Robert-Bourassa, Québec nordique. Mémoire de maîtrise. Université Laval, 64 pp.
- Butorin, N.V., Vendrov, S.L., Dyakonov, K.N., Reteyum, A.Y. et Romanenko, V.I., 1973. Effects of the Rybinsk Reservoir on the surrounding area. In : Ackerman, W.C., White, G.F., Worthington, E.B. et Ivens, J.L. (Éd.), *Man-made lakes : their problems and environmental effects*. Conference proceedings, American Geographical Union, Geographical Monograph, Knoxville, pp. 247-250.
- Changnon, S.A. Jr. et Jones, D.M.A., 1972. Review of the influences of the Great Lakes on weather. *Water Resources Research* 8, 360-371.
- Cloutier, J., 1995. Analyse dendroécologique du frange forestière soumise à l'entourbement sur une île centrale du lac Bienville, Québec subarctique. Mémoire de maîtrise, Université Laval, 60 pp.
- Cogbill, C.V., 1985. Dynamics of the boreal forest of the Laurentian Highlands, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 15, 252-261.
- Dyakonov, K.N. et Reteyum, A.Y., 1965. The local climate of the Rybinsk Reservoir. *Soviet Geography : Review and Translation* 6, 40-49.
- Delwaide, A., Fillion, L. et Payette, S., 1991. Spatiotemporal distribution of light rings in subarctic black spruce, Québec. *Canadian Journal of Forest Research* 21, 1878-1832.
- Despots, M. et Payette, S., 1992. Recent dynamics of jack pine (*Pinus banksiana*) at its northern distribution limit in northern Québec. *Canadian Journal of Botany* 70, 1157-1167.
- Ducruc, J.P., Zarnovican, R., Gerardin, V. et Jurdant, M., 1976. Les régions écologiques du territoire de la baie de James : caractéristiques dominantes de leur couvert végétal. *Cahiers de géographie du Québec* 20, 365-391.

- Eichenlaub, V.L., 1979. Weather and climate of the Great Lakes Region. University of Notre-Dame Press, Indiana, 317 pp.
- Elder, K., Dozier, J. et Michaelsen, J., 1991. Snow accumulation and distribution in an alpine watershed. *Water Resources Research* 27, 1541-1552.
- Esper, J., Cook, E.R., Krusic, P.J., Peters, K. et Schweingruber, F.H., 2003. Tests of the RCS method for preserving low-frequency variability in long tree-ring chronologies. *Tree-ring research* 59, 81-98.
- Estoque, M. et Grass, J.M., 1981. Further studies of a lake breeze part II : theoretical study. *American Meteorological Society*, 619-634.
- Filion, L., Payette, S., Gauthier, L. et Boutin, Y., 1986. Light rings in subarctic conifers as a dendrochronological tool. *Quaternary Research* 26, 272-279.
- Filion, L. Payette, S., Delwaide, A. et Bhiry, N., 1998. Insect defoliators as major disturbances factors in the high-altitude balsam fir forest of Mount Mégantic, southern Québec. *Canadian Journal of Forest Research* 28, 1832-1842.
- Filion, L. et Bégin, Y., 1998. Recent paludification of kettle holes on the central islands of Lake Bienville, northern Québec, Canada. *Holocene* 8, 91-96.
- Filion, L. et Payette, S., 1976. La dynamique de l'enneigement en région hémis-arctique, Poste-de-la-Baleine, Nouveau-Québec. *Cahiers de géographie du Québec* 20, 275-301.
- Findlay, B.F. et Gagnon, R.M., 1976. Premiers resultants du réseau climatologique de la Baie James. *Environnement Baie James, Symposium 1976 : Compte rendu d'Environnement Canada, Montréal*, pp. 513-566.
- Frey, W., 1983. The influence of snow on growth and survival of planted trees. *Arctic and Alpine Research* 15, 241-251.
- Gagnon, O., 2000. Caractérisation des effets thermiques du réservoir Robert-Bourassa, Québec nordique. Mémoire de maîtrise. Université Laval, 109 pp.
- Gerardin, V., 1980. L'inventaire du capital-nature du territoire de la Baie-James, Tome 1 : Méthodologie et Description. Service des études écologiques, Environnement Canada, 398 pp.
- Gorham, E., 1991. Northern peatlands : role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications* 1, 182-195.

- Hadley, J.L. et Smith, W.K., 1983. Influence of wind exposure on needle desiccation and mortality for timberland conifers in Wyoming, U.S.A. *Arctic and Alpine Research* 15, 127-135.
- Hadley, J.L. et Smith, W.K., 1986. Wind effects on needles of timberline conifers : seasonal influence on mortality. *Ecology* 67, 12-19.
- Hare et Ritchie, 1972
- Heinselman, M.L., 1973. Fire in the virgin forests of the Boundary Waters Canoe Area, Minnesota. *Quaternary Research* 3, 329-382.
- Hillaire-Marcel, C., 1976. La déglaciation et le relèvement isostatique sur la côte est de la baie d'Hudson. *Cahiers de géographie du Québec* 20, 185-220.
- Holmes, R.L., 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43, 69-78.
- Hustich, I., 1979. Ecological concepts and biographical zonation in the North : the need for a generally accepted terminology. *Holarctic Ecology* 2, 208-217.
- Johnson, E.A. et Gutsell, S.L., 1993. Heat budget and fire behavior associated with the opening of serotinous cones in two *Pinus* species. *Journal of Vegetation Science* 4, 745-750.
- Kinnard, N., Bégin, Y. et Cournoyer, L., 1998. Analyse dendroclimatique régionale. In: Bégin, Y., Sirois, L., Cournoyer, L. et Frydecki, J. (Éd.), *Analyse dendrochronologique des effets climatiques du réservoir Robert-Bourassa sur l'environnement forestier, Québec nordique. Rapport pour Hydro-Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval*, pp. 37-64.
- Kopec, R.J., 1965. Continentality around the Great Lakes. *Bulletin of the American Meteorological Society* 46, 54-57.
- Krause, C. et Morin, H., 1995. Changes in radial increment in stems and roots of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) after defoliation by spruce budworm. *Forestry Chronicle* 71, 747-754.
- Labrecque, É., 2000. Détérioration récente d'une forêt riveraine sous l'effet de l'enneigement au réservoir Robert-Bourassa, Québec nordique. Mémoire de maîtrise, Université Laval, 63 pp.

- Landry, B. et Mercier, M., 1992. Notions de géologie. 3^e édition, Modulo, Montréal, 565 pp.
- Lavoie, C. et Payette, S., 1992. Black spruce growth forms as a record of a changing winter environment at treeline, Québec, Canada. *Arctic and Alpine Research* 24, 40-49.
- Lavoie, L. et Sirois, L., 1998. Vegetation changes caused by recent fires in the northern boreal forest of eastern Canada. *Journal of Vegetation Science* 9, 1-10.
- Lemieux, C. et Filion, L., 2004. Tree-ring evidence for a combined influence of defoliators and extreme climatic events in the dynamics of a high-altitude balsam-fir forest, Mount Mégantic, Québec. *Canadian Journal of Forest Research* 34, 1436-1443.
- Litynski, J.K., Levesque, S. et Gilbert, R., 1989. Étude d'impact sur le climat : rivière Ashuapmushuan. Rapport final de l'étude réalisée pour Hydro-Québec, 84 pp.
- Marchand, P.J., et Chabot, B.F., 1978. Winter water relations of tree-line plant species on Mt. Washington, New Hampshire. *Arctic and Alpine Research* 10, 105-116.
- Mathieu, C., Payette, S. et Morin, H., 1987. Chronologie 14C et développement des combes à neige du lac à l'Eau Claire, Québec nordique. *Géographie physique et quaternaire* 41, 97-108.
- Météoglobe Canada, 1992. Étude des effets climatiques suite à la création des réservoirs. Rapport déposé chez Hydro-Québec, Montréal, 239 pp.
- Morin, H. et Payette, S., 1986. La dynamique récente des combes à neige du golfe de Richmond (Québec nordique) : une analyse dendrochronologique. *Revue canadienne de botanique* 64, 2113-2119.
- Morneau, C. et Payette, S., 1989. Postfire lichen-spruce woodland recovery at the limit of the boreal forest in northern Québec. *Canadian Journal of Botany* 67, 2770-2782.
- Mysak, L.A., 1993. Variabilité et changement climatiques et les aménagements hydroélectriques dans le nord du Québec. Évaluation environnementale du projet Grande Baleine : Dossier-synthèse no.1, Bureau de soutien de l'examen public du projet Grande Baleine, 98 pp.

- Oechel, W.C. et Lawrence, T.W., 1985. Taiga. In: Chabot, B.F. et Mooney, H.A. (Éd.), *Physiological ecology of the north american plant communities*. Springer-Verlag, New-York, pp. 66-94.
- Payette, S. 1983. The forest-tundra and present tree-lines of the northern Québec-Labrador Peninsula. In : Morisset, P. et Payette, S. (Éd.), *Tree-line ecology : Proceedings of the northern tree-line conference*, *Nordicana* 47, 3-23.
- Payette, S., 1992. Fire as controlling process in the north american boreal forest. In : Shugart, H.H., Leemans, R. et Bonan, G.B.A. (Éd.), *Systems analysis of the global boreal forest*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 144-169.
- Payette, S., Morneau, C., Sirois, L. et Despons, M., 1989. Recent fire history of the northern Quebec biomes. *Ecology* 70, 656-673.
- Payette, S., Fillion, L. et Ouzilleau, J., 1973. Relations neige-végétation dans la toundra forestière du Nouveau-Québec. *Baie d'Hudson. Naturaliste canadien* 100, 493-508.
- Payette, S. et Gagnon, R., 1985. Late Holocene deforestation and tree regeneration in the forest-tundra of Québec. *Nature* 313, 570-572.
- Payette, S. et Lagarec, D., 1972. Observations sur les conditions d'enneigement à Poste-à-la-Baleine, Nouveau-Québec, hiver 1972. *Cahiers de géographie du Québec* 16, 469-481.
- Payette, S. et Rochefort, L., 2001. *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Presse de l'Université Laval, Québec, 621 pp.
- Payette, S., 1974. Classification écologique des formes de croissance de *Picea glauca* (Moench.) Voss et *Picea mariana* (Mill.) BSP en milieux subarctiques et subalpins. *Naturaliste Canadien* 101, 893-903.
- Payette, S., 1984. Peat inception and climatic change in northern Québec. In : Mörner, N.A. et Karlén, W. (Éd.), *Climatic changes on a yearly to millennial basis*, Dordrecht, pp. 173-179.
- Pelletier, L., Moore, T.R., Roulet, N.T., Garneau, M. et Beaulieu-Audy, V., 2007. Methane fluxes from three peatlands in the La Grande Rivière watershed, James Bay lowland, Canada. *Journal of Geophysical Research* 112, G01018, doi : 10.1029/2006JG000216.

- Pereg, D. et Payette, S., 1998. Development of black spruce growth forms at treeline. *Plant Ecology* 138, 137-147.
- Perrier, M.G., 1975. Influences des modifications de surface sur le climat (Région de la Baie de James). *Meteorology* 116, McGill University, Montréal, 131 pp.
- Richard, P.J.H., Larouche, A. et Bouchard, M.A., 1982. Âge de la déglaciation finale et histoire postglaciaire de la végétation dans la partie centrale du Nouveau-Québec. *Géographie physique et quaternaire* 36, 63-90.
- Richards, T.L., Dragert, H. et McIntyre, D.R., 1966. Influence of atmospheric stability and overwater fetch in winds over lower Great Lakes. *Monthly Weather Review* 94, 448-453.
- Rikhter, G.D., 1963. Snow as an ecological factor in plant and animal life in the north. *Problems of the North (Problemy Severa)* 7, 91-96.
- Rousseau, J., 1952. Les zones biologiques de la péninsule Québec-Labrador et l'hémiarctique. *Revue canadienne de botanique* 30, 436-474.
- Schweingruber, F.H., 1988. *Tree rings : Basics and applications of dendrochronology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 276 pp.
- Scott, P.A., Hansell, R.I.C. et Erickson, W.R., 1993. Influences of wind and snow on northern tree-line environments at Churchill, Manitoba, Canada. *Arctic* 46, 316-323.
- Scott, P.A. et Rouse, R.I.C., 1995. Impacts of increased winter snow cover on upland tundra vegetation : a case study. *Climate Research* 5, 25-30.
- Scurfield, G., 1973. Reaction wood : its structure and function. *Science* 179, 647-655.
- Société d'énergie de la Baie James, 1978. *Connaissance du milieu des territoires de la Baie James et du Nouveau-Québec*. SEBJ, Montréal, 297 pp.
- Simard, M., 1997. *Impact de l'aménagement hydroélectrique : une analyse dendrochronologique de l'épinette noire sur une île située au nord du réservoir Robert-Bourassa, Québec nordique*. Essai de baccalauréat, Université Laval, 29 pp.
- Sirois, L., 1997. Distribution and dynamics of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) at its northern limit in northern Québec. *Ecology* 72, 619-627.

- Stockton, C.W. et Fritts, H.C., 1973. Long-term reconstruction of water level changes for Lake Athabasca by analysis of tree rings. *Water Resources Bulletin* 9, 1006-1027.
- Sun, W.Y. et Yildirim, A., 1989. Air mass modification over Lake Michigan. *Boundary-Layer Meteorology* 48, 345-360.
- Tarnocai, C., 2006. The effect of climate change on carbon in Canadian peatlands. *Global and Planetary Change* 53, 222-232.
- Thom, B.G. et Grandberg, H., 1970. Patterns of snow accumulation in a forest-tundra environment, Central Labrador-Ungava. In : *Proceedings of the 1970 Eastern Snow Conference*, New York, pp. 76-86.
- Timoney, K., Kershaw, G.P. et Olesen, D., 1992. Late winter snow-landscape relationships in the subarctic near Hoarfrost River, Great Slave Lake, Northwest Territories, Canada. *Water Resources Research* 28, 1991-1998.
- Tremblay, J. et Bégin, J., 2005. The effects of snow packing on tree growth forms on an island in a recently created reservoir in northern Québec, Canada. *Écoscience* 12, 530-539.
- Tremblay, J., 1999. Analyse dendroécologique du changement récent dans le régime d'enneigement insulaire au réservoir Robert-Bourassa, Québec nordique. *Mémoire de maîtrise*, Université Laval, Québec, 77 pp.
- Tremblay, M., 1998. Croissance de l'épinette noire sur une île du réservoir Robert-Bourassa en Jamésie : une analyse densitométrique. *Mémoire de maîtrise*, Université Laval, Québec, 59 pp.
- Vendrov, S.L. et Malik, L.K., 1965. An attempt to determine the influence of large reservoirs on local climate. *Soviet Geography : Review and Translation* 5, 25-40.
- Wardle, P., 1968. Engelmann spruce (*Picea engelmannii* Engel.) at its upper limits on the front range, Colorado. *Ecology* 49, 483-395.
- Yamaguchi, D.K., Filion, L. et Savage, M., 1993. Relation of temperature and light ring formation at subarctic treeline and implications for climate reconstruction. *Quaternary Research* 39, 256-262.

Zoltai, S.C. et Pollett, F.C., 1983. Wetlands in Canada : their classification, distribution and use. In : Gore, A.J.P. (Éd.), Ecosystems of the world 4B : Mires : Swamp, Bog, Fen and Moor, Elsevier, Amsterdam, pp. 245-511.

