

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement

**RÉPONSE DE L'ÉPINETTE NOIRE AUX VARIATIONS DE NIVEAU
D'EAU DE LACS DU MOYEN NORD DU QUÉBEC**

Par
Yves Bouthillier

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

Jury d'évaluation

Président du jury et
examineur interne

Pierre Francus
INRS-ETE

Examineur externe

Cornelia Krause
UQAC

Directeur de recherche

Yves Bégin
INRS-ETE

Codirecteur de recherche

Dominique Arseneault
UQAR



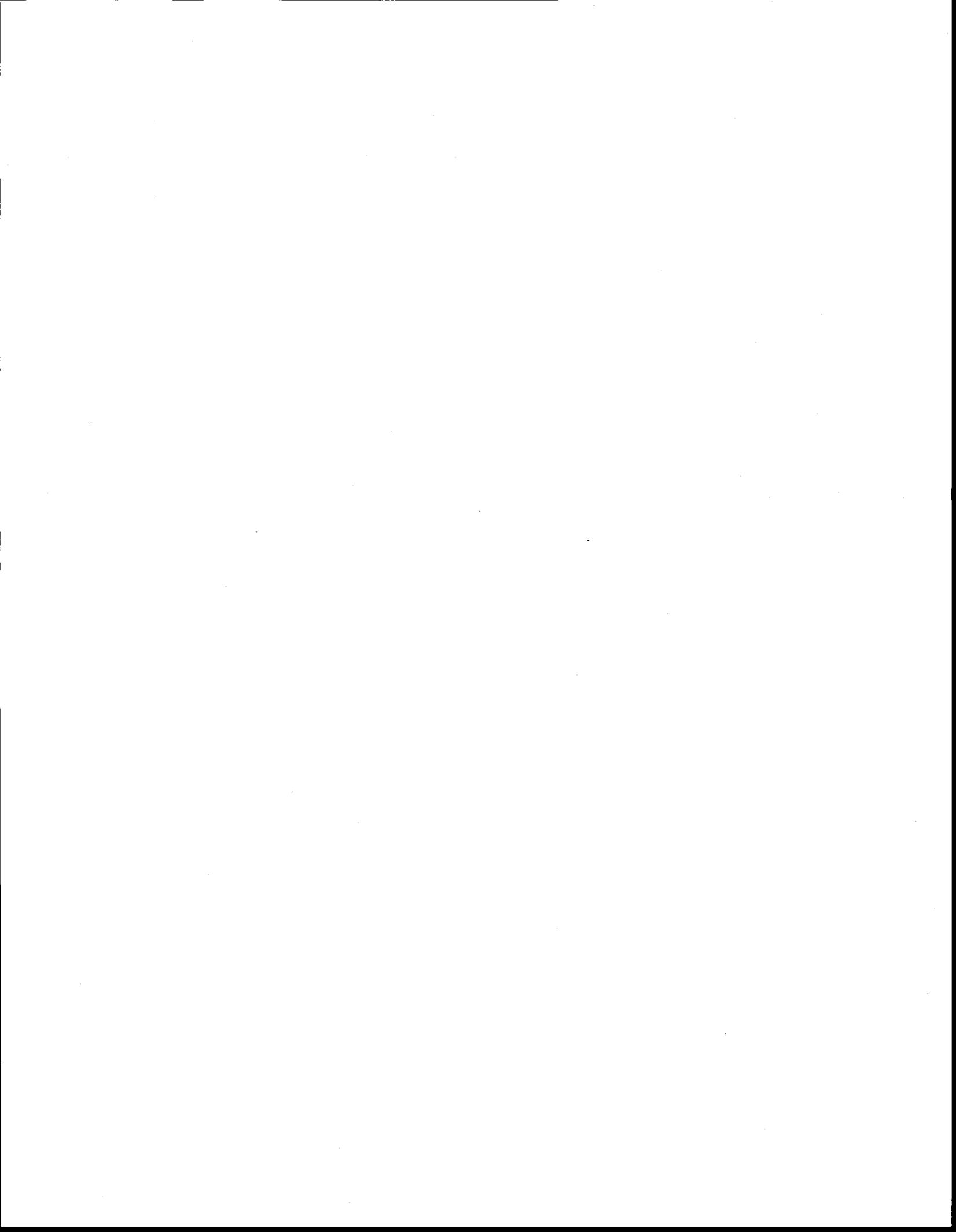
REMERCIEMENTS

Ce projet de maîtrise a été réalisé grâce à la confiance que mon directeur, Yves Bégin, et mon codirecteur, Dominique Arseneault m'ont accordée. Leurs conseils et leur appui ont été essentiels afin de mener à terme ce projet.

De plus, je tiens à remercier l'équipe de Dominique Arseneault, Fabio Gennaratti, Pierre-Paul Dion et Gabriel Rodrique pour la précieuse aide fournie lors de la mission de terrain de l'été 2011. Pour la mission de terrain de l'automne 2012, je remercie Thibault Labarre. Je remercie Thibault Labarre et Joëlle Marion pour leurs conseils dans le cadre de mes travaux de laboratoire et de traitement des données et Julia Autin pour les données et les échantillons qu'elle m'a fournis pour les sites que l'on partageait. J'aimerais également remercier l'équipe d'ARCHIVES pour avoir choisi de m'impliquer dans leur projet.

Enfin, un énorme merci à mes amis et à ma famille pour leur soutien et leur patience.

Ce projet de maîtrise a été cofinancé par Hydro-Québec, Ouranos (Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques) et le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG). Il a également bénéficié du soutien financier du Réseau ArticNet, du programme de formation scientifique dans le Nord du ministère des Affaires indiennes et du Nord canadien et du Centre d'études nordiques.



RÉSUMÉ

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet ARCHIVES, projet plus vaste portant sur la reconstitution hydroclimatique millénaire dans le secteur boréal. L'objectif principal de cette étude consiste à vérifier si un signal de variation de niveau d'eau lacustre doit être considéré dans l'analyse de la croissance des subfossiles de lac d'épinette noire (*Picea mariana* Mill. BSP.) qui pourraient servir à reconstituer les températures ou les précipitations à l'échelle du dernier millénaire.

Le design expérimental tire profit de la présence de lacs dont les niveaux d'eau ont été modifiés par la construction de digues du complexe hydroélectrique de La Grande Rivière et de la route Trans-Taïga. Trois types de lacs ont été considérés soit, deux lacs dont le niveau d'eau n'a pas été affecté, deux dont le niveau d'eau a été abaissé et deux dont le niveau d'eau a été élevé. Dans chaque site, nous avons comparé la croissance moyenne de dix épinettes noires riveraines présentant des tiges inclinées vers le lac avec la croissance moyenne de dix épinettes de taille semblable situées en retrait en forêt. De même, la croissance entre les épinettes noires riveraines des différents types de lacs a été comparée ainsi que la croissance à deux hauteurs dans la tige. Aucun changement dans la croissance n'a été observé pour l'ensemble des tiges d'épinettes noires, indiquant que les niveaux d'eau ont un effet négligeable sur la croissance.

De plus, l'effet de l'immersion sur la croissance annuelle et anatomique de l'épinette noire a été étudié à l'aide de 16 tiges mortes immergées et 16 tiges vivantes d'intérieur (en forêt). L'ensemble des tiges a répondu de façon différente en croissance à deux hauteurs d'échantillonnage (50 cm et 4 m du sol) l'année suivant l'inondation du site. L'analyse anatomique avec l'imagerie numérique faite sur 4 rayons a démontré que les proportions de bois final ont augmenté pour l'ensemble des arbres. Ces résultats indiquent que l'inondation permanente des arbres sur le site a eu un effet sur leur croissance et le type de bois produit.



TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Les arbres comme indicateurs paléoclimatiques	1
1.2	Croissance de l'épinette noire riveraine et variations de niveaux d'eau.....	2
1.3	Anatomie de l'épinette noire et disponibilité en eau.....	5
2	OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES	7
2.1	Objectif principal.....	7
2.2	Sous-objectif.....	8
3	RÉGION D'ÉTUDE	9
3.1	Topographie et géomorphologie.....	9
3.2	Hydrologie.....	9
3.3	Climat	10
3.4	Végétation	11
4	MÉTHODES	13
4.1	Échantillonnage	13
4.1.1	<i>Analyse de croissance intrasite</i>	14
4.1.2	<i>Analyse de croissance intersite</i>	14
4.1.3	<i>Analyse de croissance intraarbre</i>	15
4.1.4	<i>Analyse de croissance et anatomique en milieu immergé</i>	15
4.2	Largeur des cernes annuels de croissance et interdatation	21
4.3	Mesures anatomiques	22
4.4	Standardisation et analyses.....	23
4.4.1	<i>Statistiques et analyses</i>	25
5	RÉSULTATS	26
5.1	Conditions de croissance des arbres sur la rive et des arbres d'intérieur	26
5.2	Conditions de croissance riveraine selon la variation de niveau d'eau.....	31
5.3	Croissance dans la tige selon la hauteur de coupe.....	34
5.4	Conditions de croissance selon les conditions d'immersion.....	37
5.5	Croissance anatomique selon les conditions d'immersion.....	41

6	DISCUSSION	45
6.1	Tolérance des tiges riveraines aux variations lacustres	45
6.2	Tiges d'épinettes noires riveraines et tiges subfossiles.....	46
6.3	Croissance en milieu immergé persistant.....	47
6.4	Réponse anatomique de l'épinette noire à l'immersion prolongée.....	48
7	CONCLUSION	51
8	RÉFÉRENCES	53
9	ANNEXE	65
9.1	Statistiques descriptives – Sites principaux.....	65
9.2	Statistiques descriptives – Site immergé	68

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 4.1	CARACTÉRISTIQUES DES SITES ÉCHANTILLONNÉS	17
TABLEAU 5.1	CORRÉLATION DE PEARSON ($P < 0,005$) ENTRE LA SÉRIE MOYENNE INDICÉE SUR LA RIVE ET À L'INTÉRIEUR À 50 CM DU SOL POUR LA PÉRIODE 1977-2010.....	28
TABLEAU 5.2	CORRÉLATION DE PEARSON ($P < 0,05$) ENTRE LA CROISSANCE MOYENNE INDICÉE DES ARBRES SUR LA RIVE (COUPE À 50 CM), LA DISTANCE ET L'ORIENTATION PAR RAPPORT AUX SITES TÉMOINS (1977-2010).....	33
TABLEAU 5.3	CORRÉLATION DE PEARSON ($P < 0,01$) ENTRE LES HAUTEURS D'ÉCHANTILLONNAGE POUR LES SÉRIES MOYENNES INDICÉES, EN FONCTION DE LA POSITION (RIVE OU INTÉRIEUR) DANS CHAQUE SITE PRINCIPAL POUR LA PÉRIODE 1977-2010.....	35
TABLEAU 9.1	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES CHRONOLOGIES CONSTRUITES À PARTIR DES COUPES ÉCHANTILLONNÉES (ÉTÉ 2011). POUR LA COLONNE SITES, A SIGNIFIE UN LAC DONT LE NIVEAU D'EAU A ÉTÉ ABAISSÉ, T UN LAC DONT LE NIVEAU EST DEMEURÉ INCHANGÉ ET E UN LAC DONT LE NIVEAU A ÉTÉ ÉLEVÉ. POUR LA COLONNE SÉRIE, F INDIQUE LES ARBRES D'INTÉRIEUR, R LES ARBRES SUR LA RIVE. H50 = COUPE À 50 CM DU SOL ET H400 = COUPE À 400 CM DU SOL.	66
TABLEAU 9.2	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES CHRONOLOGIES CONSTRUITES À PARTIR DES COUPES ÉCHANTILLONNÉES À L'AUTOMNE 2012.	68



LISTE DES FIGURES

FIGURE 3.1	DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES DES ARCHIVES CLIMATIQUES DU CANADA DE LA STATION DE L'AÉROPORT DE LA GRANDE (LGA) ENTRE 1971 ET 2000.....	10
FIGURE 4.1	LOCALISATION DES 6 SITES PRINCIPAUX. LES LACS ABAISSÉS SONT INDIQUÉS EN ROUGE, LES LACS TÉMOINS EN VERT ET LES LACS REHAUSSÉS EN BLEU. LA ROUTE TRANS-TAÏGA ET LES ROUTES D'ACCÈS SONT EN GRIS FONCÉ. LE SITE E-K20 EST ABSENT DE LA CARTE; IL EST SITUÉ À ENVIRON 450 KM À L'OUEST DES 6 SITES PRINCIPAUX.	18
FIGURE 4.2	TYPES DE SITES ÉCHANTILLONNÉS À LA RIVE SELON LE TYPE DE VARIATION DE NIVEAU D'EAU. ABAISSÉ (A), INCHANGÉ (B), ÉLEVÉ (C). SITE IMMERGÉ ÉCHANTILLONNÉ DANS LA ZONE IMMERGÉE (D).	19
FIGURE 4.3	SITE IMMERGÉ E-K20 SITUÉ ENVIRON AU KM 20 DE LA ROUTE TRANS-TAÏGA, DU CÔTÉ SUD DE LA ROUTE. IL EST SITUÉ À ENVIRON 450 KM À L'OUEST DES 6 SITES PRINCIPAUX.....	20
FIGURE 4.4	MESURES ANATOMIQUES PRISES POUR CHAQUE CERNE LE LONG D'UNE FILE RADIALE ENTRE 1960 ET 1990 AVEC LE LOGICIEL AXIOVISION 4.3 LE. 1 PIXEL = 0,33 µM	23
FIGURE 5.1	RATIO ENTRE LA SÉRIE MOYENNE BRUTE DES ARBRES SUR LA RIVE ET CELLE DES ARBRES D'INTÉRIEUR (EN BLEU : COUPES À 50 CM DU SOL ; EN ROUGE : COUPES À 4 M DU SOL). LIGNE POINTILLÉE VERTICALE = CONSTRUCTION DE LA ROUTE/DIGUES (1977).....	27
FIGURE 5.2	CROISSANCE MOYENNE INDICÉE À 50 CM DU SOL DES ARBRES SUR LA RIVE (BLEU) ET D'INTÉRIEUR (ORANGE). LIGNE POINTILLÉE = CONSTRUCTION DE LA ROUTE/DIGUES (1977).	29
FIGURE 5.3	SENSIBILITÉ MOYENNE DES SÉRIES MOYENNES À 50 CM DU SOL DES ARBRES SUR LA RIVE (BLEU) ET D'INTÉRIEUR (ORANGE). LIGNE POINTILLÉE = CONSTRUCTION DE LA ROUTE/DIGUES (1977).....	30
FIGURE 5.4	CROISSANCE MOYENNE INDICÉE DES COUPES À 50 CM DU SOL DES ARBRES SUR LA RIVE POUR LES SITES DONT LE NIVEAU D'EAU A ÉTÉ ABAISSÉ (ROUGES), ÉLEVÉ (BLEUS) ET EST DEMEURÉ INCHANGÉ (VERTS). LIGNE NOIRE POINTILLÉE = CONSTRUCTION DE LA ROUTE/DIGUES (1977).	32
FIGURE 5.5	SENSIBILITÉ MOYENNE DES COUPES À 50 CM DU SOL DES ARBRES SUR LA RIVE POUR LES SITES DONT LE NIVEAU D'EAU A ÉTÉ ABAISSÉ (ROUGES), ÉLEVÉ (BLEUS) ET DEMEURÉ INCHANGÉ (VERTS). LIGNE NOIRE POINTILLÉE = CONSTRUCTION DE LA ROUTE/DIGUES (1977).....	33
FIGURE 5.6	CROISSANCE MOYENNE INDICÉE POUR LES ARBRES RIVERAINS POUR DEUX HAUTEURS DE COUPE (EN BLEU: COUPES À 50 CM DU SOL; EN ROUGE: COUPES À 4 M DU SOL). LIGNE POINTILLÉE = CONSTRUCTION DE LA ROUTE/DIGUES (1977).....	36
FIGURE 5.7	RATIO ENTRE LA SÉRIE MOYENNE BRUTE DES ARBRES MORTS IMMERGÉS ET LA SÉRIE MOYENNE BRUTE DES ARBRES D'INTÉRIEUR (EN BLEU : COUPES À 50 CM DU SOL ; EN ROUGE : COUPES À 4 M DU SOL). LIGNE POINTILLÉE VERTICALE = CONSTRUCTION DE LA ROUTE (1974).	38
FIGURE 5.8	CROISSANCE MOYENNE INDICÉE À 50 CM DES ARBRES MORTS IMMERGÉS ET D'INTÉRIEUR (BLEU : IMMERGÉS ; ORANGE : INTÉRIEUR). LIGNE POINTILLÉE = CONSTRUCTION DE LA ROUTE (1974).	39

FIGURE 5.9	SENSIBILITÉ MOYENNE DES SÉRIES MOYENNES À 50 CM DES ARBRES MORTS IMMERGÉS ET D'INTÉRIEUR (BLEU : IMMERGÉS ; ORANGE : INTÉRIEUR). LIGNE POINTILLÉE = CONSTRUCTION DE LA ROUTE (1974).	39
FIGURE 5.10	CROISSANCE MOYENNE INDICÉE À 50 CM (EN BLEU) ET 4 M (EN ROUGE) DU SOL DES ARBRES MORTS IMMERGÉS. LIGNE POINTILLÉE = CONSTRUCTION DE LA ROUTE (1974).	40
FIGURE 5.11	CROISSANCE MOYENNE INDICÉE À 50 CM (EN BLEU) ET 4 M (EN ROUGE) DU SOL DES ARBRES D'INTÉRIEUR. LIGNE POINTILLÉE = CONSTRUCTION DE LA ROUTE (1974).	40
FIGURE 5.12	NOMBRE DE TRACHÉIDES PAR FILE RADIALE PRODUITES ANNUELLEMENT POUR LES RAYONS D'ARBRES MORTS IMMERGÉS (EN BLEU; 3R : LIGNE PLEINE, 8R : LIGNE POINTILLÉE) ET D'ARBRES D'INTÉRIEUR (EN ORANGE; 1F : LIGNE PLEINE, 5F : LIGNE POINTILLÉE). LIGNE NOIRE POINTILLÉE = CONSTRUCTION DE LA ROUTE (1974).	42
FIGURE 5.13	PROPORTION (%) DE TRACHÉIDES DE BOIS FINAL PAR CERNE. LIGNE NOIRE POINTILLÉE = CONSTRUCTION DE LA ROUTE (1974).	43
FIGURE 5.14	PROPORTION (%) DE LA LARGEUR DE BOIS FINAL SUR LA LARGEUR TOTALE DU CERNE. LIGNE NOIRE POINTILLÉE = CONSTRUCTION DE LA ROUTE (1974).	44
FIGURE 9.1	DURÉE DE VIE DES TIGES ÉCHANTILLONNÉES À LA RIVE ET D'INTÉRIEUR (COUPES À 50 CM DU SOL). LES SITES AVEC LE PRÉFIXE A ONT UN NIVEAU D'EAU ABAISSÉ (ROUGE), CEUX AVEC LE PRÉFIXE T LE NIVEAU D'EAU EST DEMEURÉ INCHANGÉ (VERT) ET CEUX AVEC LE PRÉFIXE E LE NIVEAU D'EAU A ÉTÉ HAUSSÉ ÉLEVÉ (BLEU).	67
FIGURE 9.2	DURÉE DE VIE DES TIGES ÉCHANTILLONNÉES (COUPES À 50 CM DU SOL). LES ARBRES MORTS IMMERGÉS SONT EN BLEU ET LES ARBRES D'INTÉRIEUR EN ORANGE.	69

1 INTRODUCTION

1.1 Les arbres comme indicateurs paléoclimatiques

Les données instrumentales sur les températures du XX^e siècle laissent présager une augmentation des températures due en partie au relâchement dans l'atmosphère d'importantes quantités de gaz à effet de serre depuis le début de l'ère industrielle (Jansen *et al.*, 2007). Des reconstitutions climatiques millénaires ont été construites avec différents indicateurs naturels afin de vérifier l'impact de l'activité humaine sur cette augmentation des températures (Arseneault *et al.*, 2013). Ces reconstitutions sont nécessaires étant donné l'absence de données instrumentales sur le climat pour la période préindustrielle (Jansen *et al.*, 2007). Les cernes annuels de croissance des arbres vivants et des arbres subfossiles, c'est-à-dire les arbres morts qui ont été conservés dans le sol et l'eau, figurent parmi les meilleurs indicateurs naturels qui permettent des reconstructions climatiques millénaires avec une résolution annuelle (Fritts, 1976; D'Arrigo *et al.*, 2006; Esper *et al.*, 2012). Toutefois, le petit nombre de reconstitutions climatiques robustes qui ont pu être développées jusqu'à maintenant et leur répartition géographique hétérogène limitent la qualité et la représentativité des reconstitutions qui peuvent être réalisées à grande échelle spatiale (continentale, hémisphérique, globale). La forêt boréale nord-américaine en particulier est très mal représentée dans ces réseaux de longues séries dendrochronologiques (Jones *et al.*, 2009; Arseneault *et al.*, 2013).

L'épinette noire (*Picea mariana* Mill. BSP.) est l'espèce arborescente la plus abondante de la forêt boréale nord-américaine et de ce fait elle présente un grand potentiel pour aider à reconstituer le climat (Lamhamedi et Bernier, 1994; CEC, 1997). La prépondérance de l'épinette noire tant dans les milieux humides que mésiques de la forêt boréale en fait un excellent indicateur naturel pour l'élaboration de longues reconstitutions climatiques (Loiaiciga, 1993; Bégin, 2000; Vallée et Payette, 2004). De plus, les tiges subfossiles conservées sur le fond des lacs boréaux peuvent témoigner des conditions ayant influencé la croissance lors de périodes plus anciennes que celles fournies par les arbres vivants (Arseneault *et al.*, 2013). La croissance des tiges d'épinettes noires subfossiles a été influencée par les conditions environnementales au moment de la période de vie des tiges. Comme les tiges subfossiles sont recueillies sur le fond

des lacs à proximité de la rive, elles ont été influencées par des facteurs environnementaux semblables à ceux qui influencent les tiges riveraines actuellement vivantes. Étant donné que les reconstitutions climatiques se concentrent généralement sur des variables comme les températures ou les précipitations estivales, il est important de vérifier si la croissance des épinettes noires riveraines est influencée par les fluctuations des niveaux d'eau des lacs.

1.2 Croissance de l'épinette noire riveraine et variations de niveaux d'eau

L'influence des conditions environnementales et climatiques sur la croissance des arbres, telle l'épinette noire, se traduit par une réponse biologique qui peut être analysée afin de reconstituer les conditions au moment de la production du bois. Par exemple, l'écoulement régional influence la disponibilité en eau pour les arbres (Boucher et al., 2010), ce qui peut se refléter dans la largeur des cernes annuels de croissance (Deslauriers et al., 2010). L'étude des cernes produits annuellement en plan radial, la dendrochronologie, peut donc expliquer des événements hydrologiques passés par leurs effets sur les arbres. L'une des branches de la dendrochronologie, la dendrohydrologie, permet la reconstitution de bilans hydrologiques annuels ainsi que la reconstitution des autres événements hydrologiques ayant altéré le milieu riverain où poussent les arbres, telles les crues saisonnières ou les inondations (Boucher et al., 2010).

Sigafoos (1961) fut l'un des premiers utilisateurs de la dendrochronologie pour l'étude des relations entre les conditions hydrologiques et la végétation en milieu riverain. Il a conclu, à l'aide des arbres des rives de la rivière Potomac, que les patrons de croissance de la végétation riveraine étaient influencés par la fréquence et l'amplitude des crues. Depuis, plusieurs études ont utilisé la dendrochronologie pour comprendre davantage la relation entre les variables hydrologiques comme les précipitations et l'écoulement régional, et la réponse biologique des arbres (Osterkamp et Hupp, 2010). Par exemple, Stockton et Fritts (1973) ont démontré que la disponibilité de l'eau et la température régissent l'équilibre en eau des arbres. L'équilibre en eau des arbres influence à son tour la production de bois, soit le rythme de croissance (Gärtner et

Heinrich, 2010). Cette réponse peut se manifester par la formation de cernes diagnostiques, un changement dans les patrons de croissance radiale et par une variation de la densité du bois des cernes (Loaiciga, 1993). Ainsi, les cernes de croissance des arbres constituent d'excellents indicateurs des variations hydrologiques passées, puisqu'ils permettent une datation précise de ces variations pour une région donnée, tout en couvrant des périodes pouvant atteindre quelques centaines d'années (Boucher et al., 2010).

Les variables hydrologiques ayant le plus d'impact sur la présence des arbres sur la rive sont les variations de niveau d'eau (le moment, l'amplitude et la durée) et l'activité des glaces et des vagues (Hupp, 1988; Tardif et Bergeron, 1993; Bégin, 2000; Denneler et al., 2008; Osterkamp et Hupp, 2010). En conséquence, on retrouve sur les rives des espèces ayant la capacité de tolérer les variations importantes de niveau d'eau, que ce soit un abaissement ou une élévation du niveau d'eau (Denneler et al., 1999). En milieu subarctique québécois, la très grande plasticité de l'épinette noire explique sa présence dans les milieux mal drainés, telles les tourbières et les rives de certains cours d'eau (Lamhamedi et Bernier, 1994; Pereg et Payette, 1998, Denneler *et al.*, 1999). Son abondance sur la rive des cours d'eau a permis son utilisation dans le cadre d'études sur les variations séculaires du niveau d'eau de milieux lacustres et fluviaux et sur les événements hydrologiques extrêmes, telles les crues glacielles saisonnières (Bégin et Payette, 1988; Payette et Delwaide, 1991; Bégin, 2000).

Les hausses de niveaux d'eau des lacs peuvent avoir un effet positif sur la croissance des tiges d'épinette noire si précédant la hausse du niveau d'eau, ces tiges se trouvent en conditions limitantes en eau. Toutefois, lorsque les tiges sont immergées de façon prolongée, soit sur plusieurs décennies, la mort des tiges s'ensuit (Payette et Delwaide, 1991; Asselin et Payette, 2006). Les effets physiologiques les plus importants sur une tige immergée sont une réduction en oxygène et en nutriments et la diminution de la température aux racines sous le seuil limite permettant un développement optimal pendant la période de croissance (Lamhamedi et Bernier, 1994). Même chez les espèces tolérantes aux inondations épisodiques, telle l'épinette noire, les conditions associées à l'immersion prolongée peuvent entraîner une diminution importante de la croissance et la production de substances toxiques et d'éthylène au niveau des racines

(Grossnickle, 2000). L'activité hydrodynamique sur la rive, c'est-à-dire les vagues et les crues glacielles, peut aggraver l'effet sur la croissance des tiges immergées, en entraînant leur décrochement de la rive, leur cicatrisation ou leur bris (Bégin et Payette, 1988; Bégin, 2000;).

L'effet de la hausse du niveau d'eau sur la végétation riveraine a aussi été étudié sur des sites ayant subi une modification anthropique du bilan hydrologique d'un cours d'eau ou d'une région donnée. Les résultats obtenus varient entre les espèces étudiées et les contextes. Denneler et al. (2008) ont étudié l'effet de la construction de barrages sur le lac Abitibi sur les peuplements riverains de cèdres blancs (*Thuja occidentalis* L.) dans le sud de la forêt boréale québécoise. Le rehaussement du niveau d'eau du lac de 1,2 mètre a entraîné un déplacement de la rive à l'intérieur de la forêt, causant la mort de nombreuses tiges et l'endommagement des tiges exposées au plan d'eau par les vagues et les crues glacielles du printemps. Cependant, la croissance radiale ne semble pas avoir été affectée par ces changements, ce qui est expliqué par la tolérance du cèdre blanc à une large étendue de conditions de croissance. De manière un peu similaire, l'étude de Bégin *et al.* (2010) sur l'exposition des tiges d'épinette noire à la rive suite au remplissage du réservoir Robert-Bourassa démontre une réduction temporaire de la croissance, mais cette dernière serait associée à une perte foliaire consécutive à une plus forte exposition aux vents après la mise en eau. Dans ce cas, la variation en croissance ne serait donc pas directement redevable à la variation du niveau d'eau.

La réponse de la croissance de l'épinette noire riveraine à un abaissement du niveau d'eau lacustre n'a pas été étudiée. Stockton et Fritts (1973) ont mesuré les effets hydrologiques et écologiques de la diminution du niveau d'eau de la rivière Peace (Saskatchewan, Canada) causée par la construction du barrage WAC Bennett Dam en 1967 sur les épinettes blanches (*Picea glauca* (Moench) Voss) établies sur les levées alluviales. Ils ont observé une diminution de la croissance radiale après 1967 attribuable à la diminution du niveau d'eau et aux variations climatiques. Quant à l'épinette noire, une étude faite sur un site tourbeux avec un drainage très lent de la forêt commerciale du sud du Québec rapporte qu'un abaissement du niveau de la nappe phréatique contribue à augmenter la température du sol et à aérer le système racinaire, ayant un effet positif sur l'absorption d'eau et des nutriments par les tiges (Prévost *et al.*, 2005). Un gain

en croissance suite à un drainage accru du peuplement d'épinette noire a été remarqué chez les jeunes tiges (≤ 4 cm de diamètre avec 1-4 m de hauteur). On ne peut inférer avec certitude une réponse de la croissance semblable sur les rives de lacs boréaux dont le niveau a été abaissé. Toutefois, Grossnickle (2000) a observé que les racines de l'épinette noire en milieu nordique doivent pousser dans un sol où le contenu en oxygène et la saturation en eau sont équilibrés, afin d'assurer le renouvellement des racelles et la croissance des racines (Krause, 2010).

1.3 Anatomie de l'épinette noire et disponibilité en eau

Les variations de la largeur des cernes annuels de croissance des arbres dépendent de la production de nouvelles cellules de xylème pendant chaque saison de croissance (Gärtner et Heinrich, 2010). La production des cellules est propre à chaque espèce et dépend du contexte écologique (*Idem*, 2010). En conséquence, les caractéristiques anatomiques des cellules et la densité du bois peuvent refléter les conditions de croissance et être utilisées pour reconstituer les conditions environnementales et climatiques du passé (Cournoyer, 2010). Par exemple, chez les conifères, l'étude de la variation de la taille du lumen et de la paroi des trachéides permet de décrire les conditions qui prévalaient au moment de la production des cellules (Vaganov, 1989). Depuis une quinzaine d'années, plusieurs études se sont attardées aux effets des conditions hydrologiques sur les caractéristiques des trachéides des espèces arborescentes.

Sass-Klaassen et al. (2006) ont analysé différentes caractéristiques des trachéides des cernes du chêne pubescent (*Quercus pubescens* Willd.) et du pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) sur des sites secs et humides dans la vallée du Rhône en Suisse. Ils ont remarqué que les années de fortes précipitations ont entraîné la formation de trachéides de plus grande taille dans le bois initial et dans le bois final chez le pin sylvestre. De Micco *et al.* (2007) ont étudié les proportions de bois initial, de bois de transition et de bois final à l'aide des trachéides du pin maritime en Italie (*Pinus Pinaster* Ait.). Ils ont observé que la production des trachéides de la zone de transition entre le bois initial et le bois final serait une réponse à l'assèchement progressif du sol et à une réduction de la croissance radiale.

Quant à l'impact des conditions hydriques du sol sur les caractéristiques des trachéides de l'épinette noire, il est peu connu. Dufour et Morin (2010) ont observé en milieu boréal que le déroulement de la saison de croissance de l'épinette noire est influencé par plusieurs facteurs. Le début de la saison de croissance est contrôlé entre autres par l'arrivée des conditions printanières, soit des températures plus chaudes et la fonte des neiges. La fin de la saison de croissance serait contrôlée par la disponibilité en eau, l'humidité de l'air, la température et l'illumination qui prévalent à partir de la mi-juillet. Il a été observé pour l'épinette noire qu'une période de croissance plus froide que la normale peut entraîner la formation de plus grande proportion de trachéides de bois final et la réduction du nombre de trachéides par cerne (Wang *et al.*, 2002, Huang *et al.*, 2011).

2 OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

2.1 Objectif principal

L'objectif principal de cette étude consiste à vérifier si un signal de variation de niveau d'eau lacustre doit être considéré dans l'analyse de la croissance des subfossiles de lac d'épinette noire qui pourraient servir à reconstituer les températures ou les précipitations à l'échelle du dernier millénaire. Sachant que les tiges subfossiles sont d'anciennes tiges riveraines, l'étude des patrons de croissance des tiges riveraines vivantes peut indiquer l'existence d'un signal de variation de niveau d'eau chez les tiges subfossiles. À notre connaissance, on a jamais vérifié si les fluctuations de niveaux d'eau créent un signal de croissance qui pourrait se mêler au signal de température ou de précipitations.

Afin d'isoler l'effet des niveaux d'eau sur la croissance des épinettes noires riveraines en milieu boréal, le design expérimental utilise des lacs dont le régime de fluctuations de niveau d'eau a été affecté par la construction de routes et de digues lors de la mise en eau des réservoirs du Complexe hydro-électrique La Grande (SEBJ, 1987). À plusieurs endroits des routes ont été construites en travers de l'exutoire de lacs, rehaussant leur niveau d'eau moyen. À l'opposé, des digues de retenue des nouveaux réservoirs ont amputé certains lacs d'une partie de leur bassin versant, diminuant leur niveau d'eau moyen. Dans le cadre de cette étude, nous avons considéré ces deux types de lacs comme des manipulations expérimentales des niveaux d'eau. Étant donné que l'on connaît la date de construction des routes et des digues, on peut mesurer la croissance des épinettes noires pour analyser leur réponse à ces traitements expérimentaux. En utilisant aussi des épinettes noires comme témoins situés en retrait de la rive, on sera ainsi en mesure d'isoler l'effet des niveaux sur la croissance des épinettes noires. Au total, six sites ont été retenus pour l'étude (2 sites abaissés, 2 sites élevés, 2 sites témoins; ci-après nommés les "sites principaux")

Les données disponibles sur la croissance de l'épinette noire riveraine en milieu boréal laissent présager l'absence d'une réponse de croissance aux variations de niveau d'eau lacustre

(Lamhamedi et Bernier, 1994; Grossnickle, 2000). Il est fort probable que la croissance des arbres qui composent la nouvelle limite riveraine des sites dont le niveau d'eau a été modifié n'ait pas changé, peu importe la hauteur à laquelle l'échantillon est pris dans la tige. Ceci serait expliqué par le court laps de temps depuis la construction des ouvrages du Complexe La Grande (30-40 ans) et la grande plasticité des conditions de croissance pour l'épinette noire dans le Nord du Québec. De plus, il est fort probable que les épinettes noires riveraines des différents sites n'aient pas subi de stress hydrique ayant pu influencer leur croissance.

2.2 Sous-objectif

D'autre part, afin de mieux connaître l'effet sur l'épinette noire d'une immersion prolongée, nous avons analysé la croissance de tiges mortes par immersion après la construction de la route Trans-Taïga dans un site (ci-après nommé le "site immergé"). Une analyse anatomique de deux tiges mortes immergées et de deux tiges vivantes non immergées provenant du même site permet de faire une vérification exploratoire de l'effet possible de l'immersion sur les trachéides de l'épinette noire. Il est donc probable que l'immersion prolongée des tiges d'épinettes noires influence leur croissance et leurs caractéristiques anatomiques (Cournoyer, 2010; Huang *et al.*, 2011).

3 RÉGION D'ÉTUDE

3.1 Topographie et géomorphologie

La région de la Baie de James couvre un territoire d'environ 350 000 km² d'ouest en est entre les 49° et 55° parallèles de latitude nord dans la province du Québec (SEBJ, 1987). Depuis l'embouchure de la Grande Rivière dans la Baie de James, l'altitude moyenne augmente progressivement jusqu'aux monts Ottish, environ 600 kilomètres plus à l'est. La plaine côtière sur les abords de la Baie de James est d'une largeur moyenne de 150 kilomètres et est composée de tourbières et de dépôts d'argile. La zone d'étude est située dans la région du plateau intermédiaire, comprise entre la plaine côtière de la baie de James et les monts Ottish. Son paysage est composé de collines et d'un grand nombre de milieux humides et de cours d'eau, dont les réservoirs artificiels du complexe hydroélectrique La Grande. À l'extrémité est du plateau intermédiaire, le relief atteint l'altitude de 500 mètres, suivi d'une augmentation abrupte avec les monts Ottish où l'élévation moyenne par rapport au niveau de la mer est de 1000 mètres (SEBJ, 1987).

3.2 Hydrologie

L'important réseau hydrographique du territoire de la baie de James explique la présence du projet hydroélectrique d'envergure de La Grande Rivière. Le plateau intermédiaire est parsemé d'un très grand nombre de lacs et de rivières qui s'écoulent dans les rivières à grand débit utilisées pour la production hydroélectrique. De nombreux milieux humides sont connectés à ces lacs et rivières (CEC, 1997). Le régime hydrique de quatre bassins versants, soit ceux de la Grande Rivière, la rivière Eastmain, la rivière Laforge et la rivière Caniapiscou a été affecté par la construction des infrastructures du Complexe entre 1972 et 1985. Les rivières La Grande, Eastmain et Laforge s'écoulent vers la baie de James à l'ouest, alors que la rivière Caniapiscou s'écoule vers le nord dans la baie d'Ungava. Selon la Société d'Énergie de la Baie James (1987), la réalisation du Complexe hydroélectrique de La Grande Rivière a créé quatre types de milieux aquatiques: des réservoirs, des zones de détournement, des rivières à débit réduit en aval des sites de détournement et La Grande Rivière au débit augmenté. Les routes et les digues sont les ouvrages les plus fréquents ayant modifié les cours d'eau périphériques aux réservoirs.

3.3 Climat

Selon la classification de Koeppen-Geiger, le climat de la région de la Baie de James est de type continental froid, caractérisé par des températures très froides en hiver et fraîches en été (Peel *et al.*, 2007). Les Archives climatiques du Canada pour la station météorologique de l'aéroport de la Grande Rivière rapportent qu'entre 1971 et 2000 (53°38'00" N, 77°42'00" O, altitude : 195,10 m), la température moyenne annuelle était de -3,1°C, avec une température moyenne en janvier de -23,2°C et de 13,7°C en juillet. La moyenne des précipitations totales annuelles pour cette période est de 683,9 mm, dont 40% des précipitations sous forme de neige (266 cm d'accumulations totales annuelles en neige). La période de gel a lieu de la mi-septembre à la mi-juin, assurant une saison de croissance de trois mois avec en moyenne 862 degrés-jours de croissance annuelle. Les données d'Environnement Canada pour la même station compilées sur la période de 2001 à 2010 indiquent que la température annuelle moyenne est de -1,3°C, celle en janvier de -20,6°C et en juillet de 15,4°C. La proportion des précipitations totales annuelles sous forme d'accumulation de neige est plus basse de 25% (180 cm), sur un total de 612,4 mm en précipitations totales (Environnement Canada, 2013).

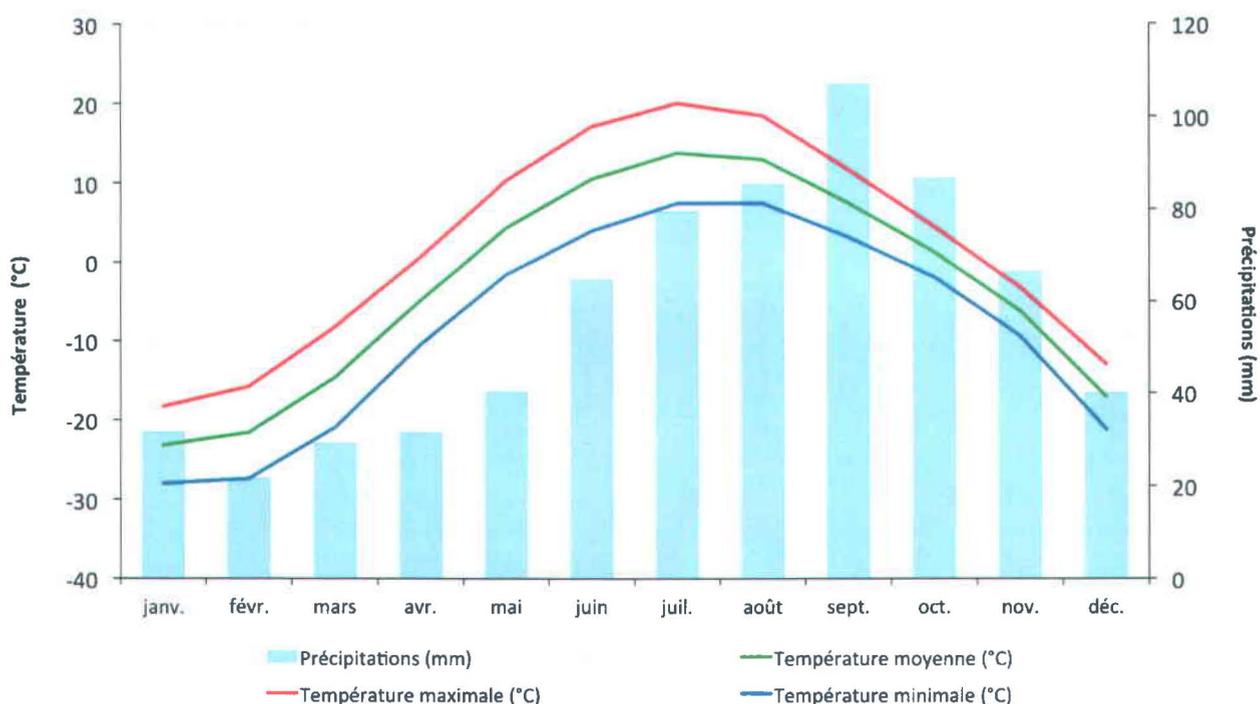
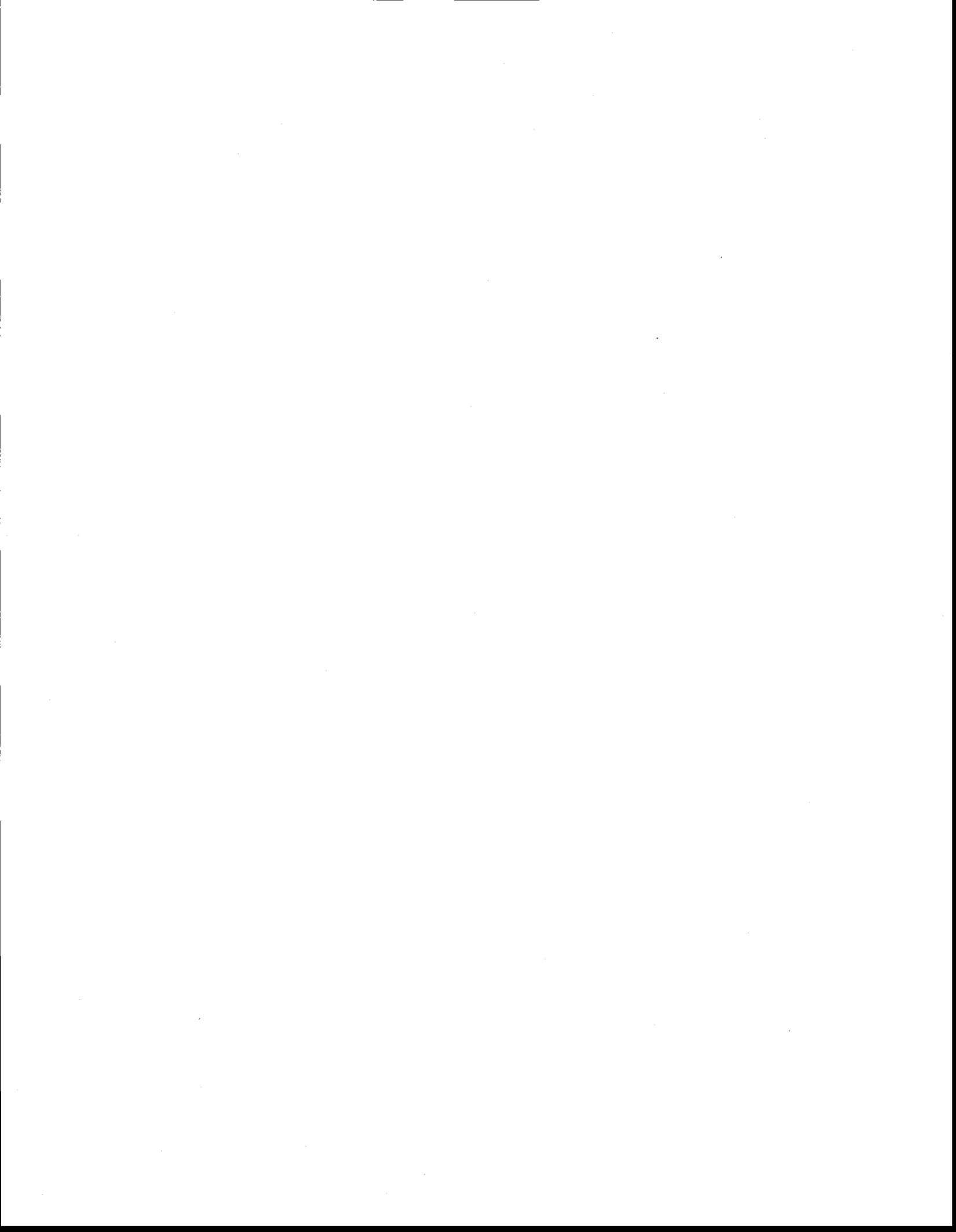


Figure 3.1 Données météorologiques des Archives Climatiques du Canada de la station de l'aéroport de La Grande (LGA) entre 1971 et 2000.

3.4 Végétation

La région écologique du Complexe hydroélectrique de La Grande Rivière est celle de la taïga (CEC, 1997). La végétation est divisée du sud au nord en trois zones, soit la pessière à mousses, la pessière à lichens et la toundra forestière, qui sont fonction du climat (Hare, 1972; Payette et Delwaide, 1994 ; De Lafontaine et Payette, 2011). Les sites à l'étude sont situés dans la pessière à lichens et la toundra forestière où la forêt est dominée par l'épinette noire (*Picea mariana* Mill. BSP.). En bordure des lacs, on retrouve des espèces arbustives, tels le saule (*Salix planifolia* Pursh, *S. bebbiana* Sarg., *S. argyrocarpa* Andersson) et l'aulne (*Alnus crispa* (Chaix) DC., *A. rugosa* (DuRoi) Sprengel). Le sol de la forêt est couvert de lichens (*Cladina rangiferina*, *C. stellaris*, *C. mitis*), d'éricacées (*Rhododendron groenlandicum*, *Empetrum nigrum*, *Kalmia augustifolia*, *Chamaedaphne calyculata*, *Vaccinium angustifolium*, *V. vitis-idaea*, *V. uliginosum*) et d'arbustes (*Betula glandulosa*).

La perturbation naturelle la plus importante de la taïga sont les feux (Payette, 1992). Certains feux peuvent affecter des milliers de km² de territoire (Stockton *et al.*, 2003). La période de rotation des feux, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que le cumul des feux ait brûlé une superficie équivalente au territoire à l'étude, varie de 40 ans à l'ouest de la région de la Baie de James à environ 500 ans à l'est (Héon 2010; Boulanger *et al.*, 2012). La régénération des peuplements d'épinette noire et de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) dépend principalement des feux qui libèrent massivement les graines contenues dans leurs cônes sérotineux (Payette, 1992; Parisien et Sirois, 2003).



4 MÉTHODES

4.1 Échantillonnage

Six sites principaux ont été échantillonnés à la fin des crues printanières entre le 26 mai et le 12 juin 2011 dans la région d'étude où se situe des lacs ayant un niveau d'eau modifié par la construction en 1977 des routes et des digues du Complexe hydroélectrique de La Grande Rivière. Les sites échantillonnés sont représentatifs de ceux utilisés pour les reconstitutions hydroclimatiques à partir des tiges d'épinettes noires subfossiles, c'est-à-dire qu'ils sont caractérisés par une transition abrupte entre la forêt et la rive. Parmi ces six sites principaux, deux sont des lacs dont le niveau d'eau a été abaissé, deux dont le niveau d'eau a été élevé et deux dont le niveau d'eau est demeuré inchangé malgré la construction d'infrastructures à l'exutoire ou à l'entrée d'eau. Au moment de l'échantillonnage, le niveau d'eau des lacs s'établit à celui observé lors de la période de croissance estivale, c'est-à-dire à un niveau ne connaissant pas d'épisodes de variations extrêmes, telles les crues saisonnières du printemps et de l'automne. Ainsi, les lacs abaissés sont caractérisés par une limite riveraine constituée d'une zone dénudée de végétation d'au moins 30 cm de haut en dessous des premières tiges d'épinettes noires riveraines. Les lacs avec un niveau d'eau élevé ont des tiges mortes immergées qui indiquent un rehaussement minimal du niveau d'eau de 30-40 cm, correspondant à une progression de la rive de 0-5 m vers l'intérieur de la forêt. La limite riveraine des lacs témoins est bien délimitée par la présence de végétation riveraine et de mousses à une distance et une hauteur inférieures à 1 mètre du lac. Les lacs témoins ne montrent pas de déplacement de la limite riveraine, tel qu'observé sur les sites abaissés et élevés.

Dans le but d'évaluer l'effet possible de la variation de niveau d'eau sur la croissance des épinettes noires riveraines de ces six sites, l'analyse de croissance est faite sur trois niveaux de comparaison. Le premier niveau de comparaison est fait sur chaque site entre les arbres riverains et les arbres en forêt, le deuxième niveau entre les arbres des différents sites et le troisième entre deux hauteurs d'échantillonnage pour chaque arbre. Ainsi, pour l'ensemble de l'analyse de croissance, 240 échantillons ont été prélevés sur les six sites principaux (10 arbres riverains et 10 arbres d'intérieur par site; trois traitements avec deux sites par traitement; deux hauteurs

d'échantillonnage par arbre). Les tiges échantillonnées n'avaient pas de dommages physiques (cicatrices, perte foliaire, déstabilisation de la tige due à l'érosion de la rive) ayant pu affecter leur croissance (Bégin *et al.*, 2010).

4.1.1 Analyse de croissance intrasite

La première analyse de croissance est faite sur chaque site (ci-après nommée "intrasite"), alors que la croissance des épinettes noires riveraines est comparée à celle des épinettes noires situées en forêt. Une telle comparaison permet de vérifier si la croissance des tiges à la rive est semblable ou différente des tiges qui ne peuvent être influencées par le niveau d'eau du lac. Pour les six sites principaux, 10 épinettes noires à moins d'un mètre de distance de la rive ont été sélectionnées selon des critères visant à s'assurer que ces tiges généreront par la suite des subfossiles dans la zone littorale. Les tiges sélectionnées avaient une hauteur minimale de 6 m et étaient inclinées vers le lac sans que leur chute éventuelle dans l'eau ne puisse être freinée par une ou plusieurs tiges. Les tiges échantillonnées sont séparées d'une distance au moins égale à leur hauteur, de manière à assurer leur indépendance. Chaque tige riveraine sélectionnée dans chaque site a été pairée à une tige de hauteur similaire située en retrait dans la forêt (ci-après nommés les "arbres d'intérieur"). Le milieu intérieur est incliné vers la rive avec une pente qui varie entre 7 et 14 degrés (Tableau. 4.1). Les arbres d'intérieur avaient une exposition par rapport à la rive semblable à la tige riveraine correspondante et se situaient plus haut en forêt à au moins 10 mètres de la rive. Plusieurs mesures ont été prises : la pente (°), l'exposition par rapport au nord géographique (°), la hauteur (m) et la distance par rapport à la rive (m). Une photo et des commentaires accompagnent les mesures prises pour chaque arbre.

4.1.2 Analyse de croissance intersite

La deuxième analyse de croissance (ci-après nommée "intersite") est faite entre les épinettes noires riveraines des six sites principaux, soit les deux lacs dont le niveau d'eau a été abaissé (A-M01 et A-M02), deux dont le niveau d'eau a été élevé (E-L16 et E-L25) et deux dont

le niveau d'eau est demeuré inchangé (T-L12 et T-L18). (Figure 4.1 et 4.3, Tableau 4.1). Les deux sites abaissés sont situés à 2,8 km de distance dans deux bassins du même lac.

4.1.3 Analyse de croissance intraarbre

La troisième analyse de croissance est faite au niveau de chaque tige échantillonnée (ci-après nommée "intraarbre"), afin d'évaluer la croissance entre les coupes transversales à 50 cm et 4 m du sol. Les travaux en cours dans la région d'étude indiquent que les tiges subfossiles de lac, qui proviennent de la portion supérieure des tiges riveraines, correspondent à une hauteur moyenne de 4 m (Autin, communication personnelle). Ainsi, la croissance des échantillons recueillis à 4 m du sol dans la présente étude s'associe à celle des échantillons qui pourraient être utilisés dans le cadre des reconstitutions hydroclimatiques millénaires. L'échantillonnage à 50 cm et 4 m du sol permet d'évaluer si l'effet possible de la variation de niveau d'eau sur la croissance est enregistré dans l'ensemble de la tige ou seulement dans une partie de la tige.

4.1.4 Analyse de croissance et anatomique en milieu immergé

L'échantillonnage pour l'analyse complémentaire de la croissance et des caractéristiques anatomiques des tiges mortes immergées a été effectué à la fin du mois de septembre 2012 (Figure 4.2 et Tableau 4.1). Des épinettes noires mortes suite à l'immersion permanente des premiers mètres de leur tige ont été échantillonnées sur un site situé en bordure de la route Trans-Taïga. Le ponceau installé sous la route a modifié le débit à l'exutoire du site, qui était auparavant un milieu humide dans lequel se déverse un ruisseau. La construction de la route a débuté en 1974 dans ce secteur, suggérant l'inondation du site en 1974 (SEBJ, 1987). Le même protocole d'échantillonnage suivi dans les six sites principaux a été ajusté aux conditions particulières de ce site. Dans ce cas-ci, la croissance des arbres en forêt est comparée à celle des arbres immergés. Les échantillons consistent en des coupes transversales (RT) à 50 cm et 400 cm sur 16 tiges mortes immergées et 16 tiges vivantes d'intérieur, pour un total de 64 échantillons (16 arbres riverains et 16 arbres d'intérieur à deux hauteurs par arbre). La pente entre l'intérieur et le milieu immergé est faible, soit d'environ 5 degrés (Tableau 4.1). De plus, pour l'ensemble des

tiges mortes échantillonnées, la masse foliaire a disparu. Les mesures prises sur chaque arbre sont les mêmes que celles prises dans les sites principaux.

Tableau 4.1 Caractéristiques des sites échantillonnés.

Site	Date de construction de la route/digues	Variation du niveau d'eau	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Exposition	Pente moyenne (°)	Nombre de tiges échantillonnées
A-M01	1977	Abaissement	54°44'36.28"N	70°11'46.50"O	512	Est	9.8	10 sur la rive 10 en forêt
A-M02	1977	Abaissement	54°45'55.09"N	70° 9'59.92"O	512	Est	6.8	10 sur la rive 10 en forêt
T-L12	1977	Aucune	54°28'9.53"N	70°24'6.88"O	550	Nord-est	12.2	10 sur la rive 10 en forêt
T-L18	1977	Aucune	54°15'9.09"N	72°22'52.95"O	435	Nord-est	13.5	10 sur la rive 10 en forêt
E-L16	1977	Élévation	54° 6'6.90"N	71°37'48.22"O	452	Nord-est	7.8	10 sur la rive 10 en forêt
E-L25	1977	Élévation	54° 9'46.67"N	70°17'16.09"O	563	Est	12.5	10 sur la rive 10 en forêt
E-K20	1974	Immersion	53°21'14.64"N	77° 8'44.93"O	196	Ouest	5	16 mortes immergées 16 en forêt
Total – Tiges échantillonnées								152

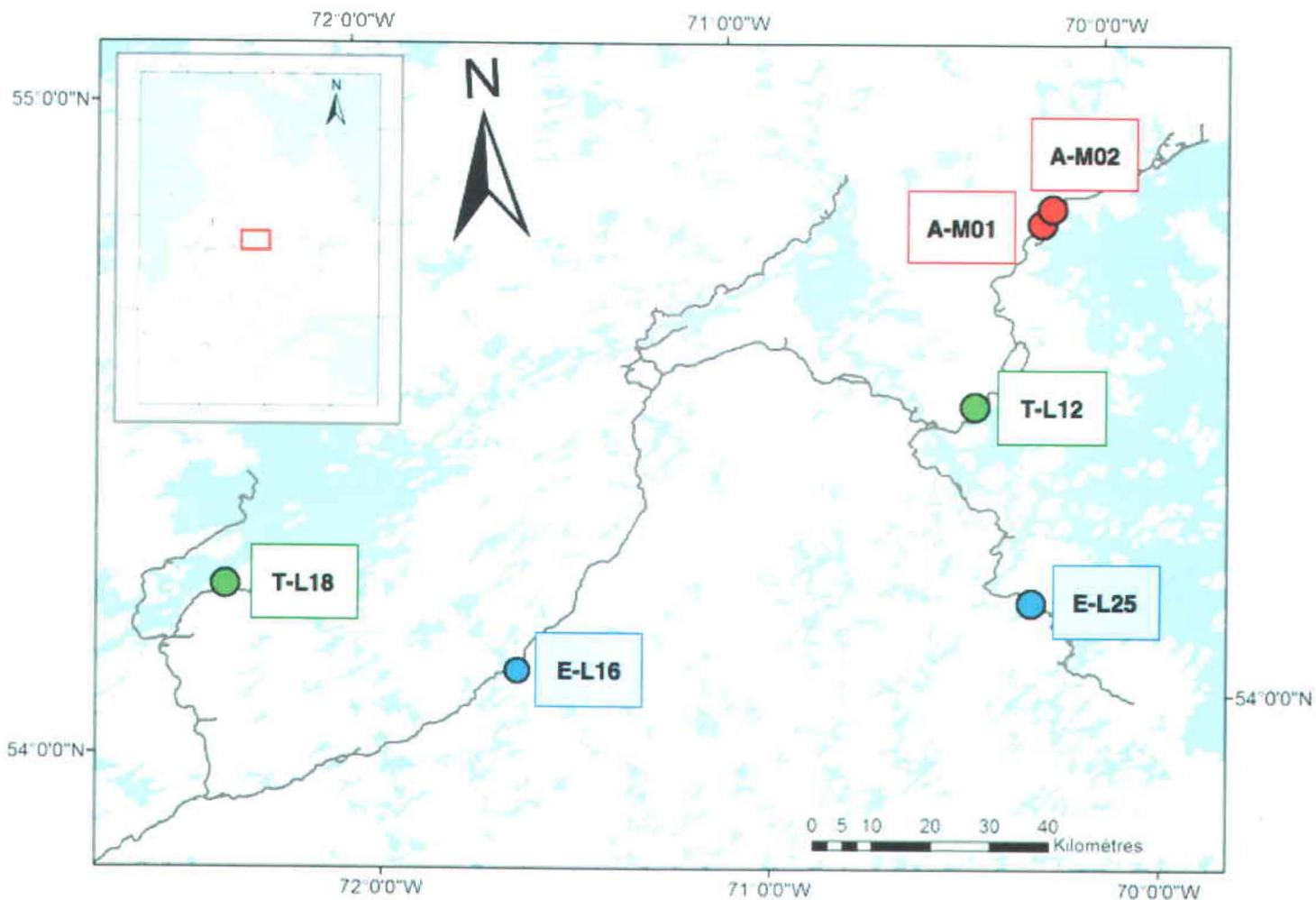


Figure 4.1 Localisation des 6 sites principaux. Les lacs abaissés sont indiqués en rouge, les lacs témoins en vert et les lacs rehaussés en bleu. La route Trans-Taïga et les routes d'accès sont en gris foncé. Le site E-K20 est absent de la carte; il est situé à environ 450 km à l'ouest des 6 sites principaux.

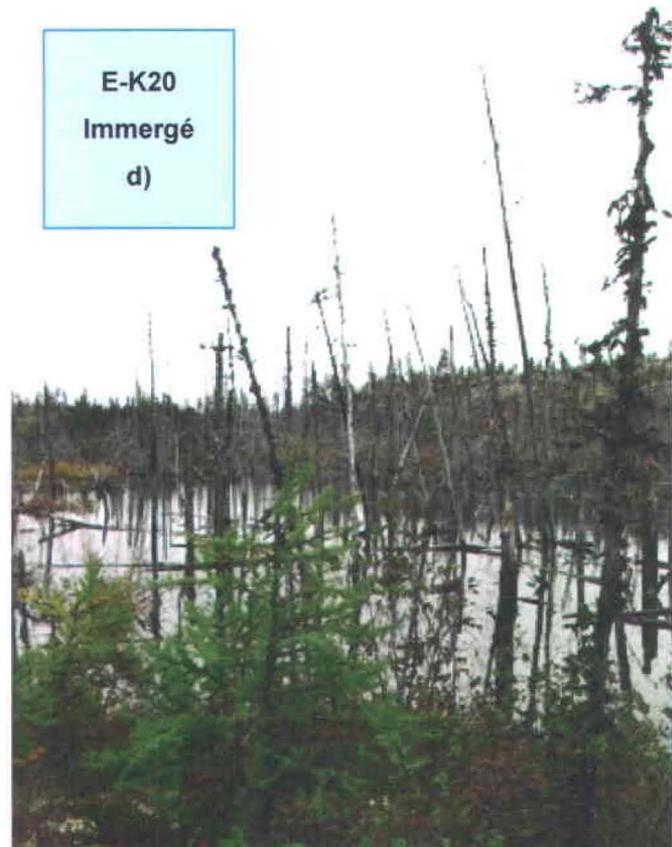
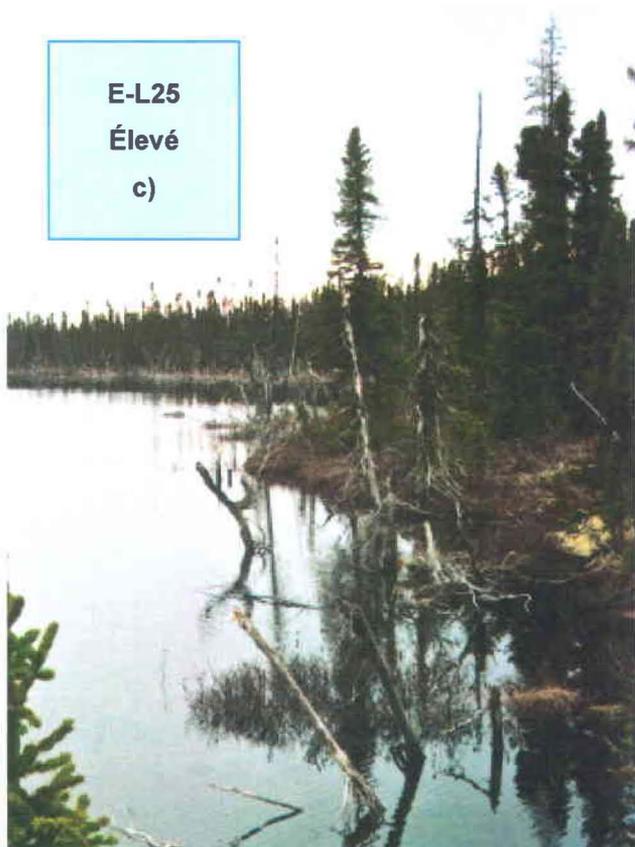
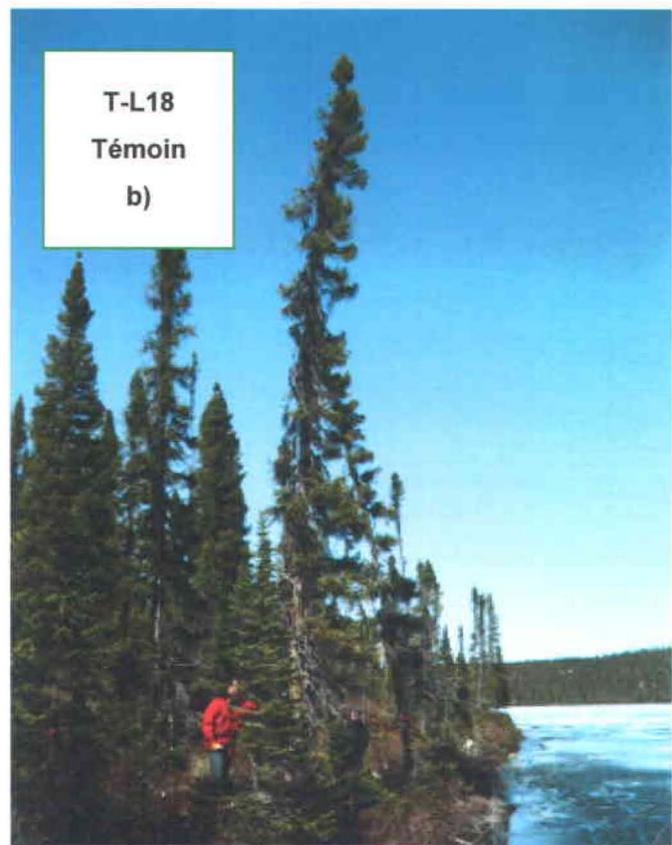
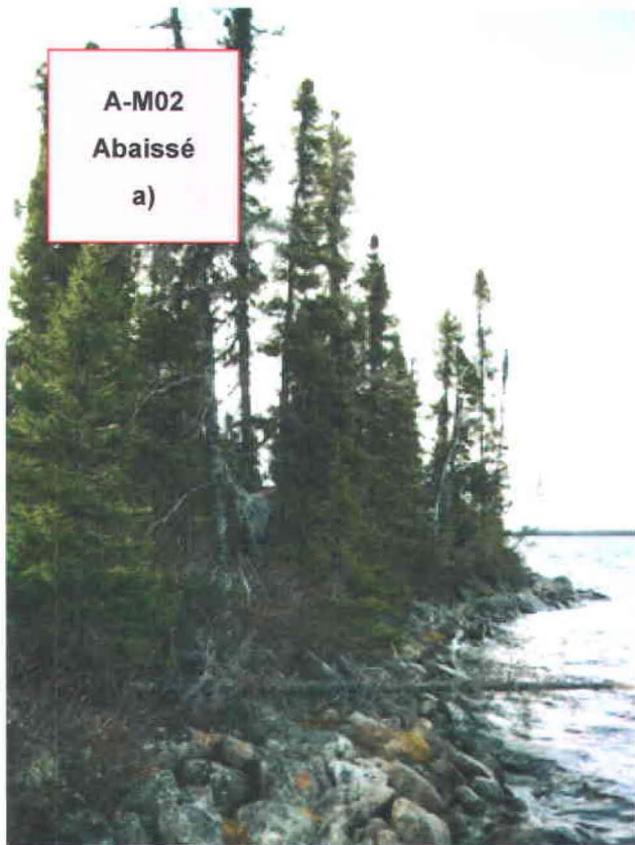


Figure 4.2 Types de sites échantillonnés à la rive selon le type de variation de niveau d'eau. Abaissé (a), Inchangé (b), Élevé (c). Site immergé échantillonné dans la zone immergée (d).



Figure 4.3 Site immergé E-K20 situé environ au km 20 de la route Trans-Taïga, du côté sud de la route. Il est situé à environ 450 km à l'ouest des 6 sites principaux.

4.2 Largeur des cernes annuels de croissance et interdatation

Les sections transversales de tronc ont été séchées puis poncées successivement avec des papiers sablés à grains de plus en plus fins, soit d'une grosseur de 60 μm à 400 μm . Par la suite, les cernes annuels de croissance des arbres échantillonnés (sites principaux et site immergé), ont été dénombrés sur deux rayons à partir du dernier cerne complètement formé. Les rayons utilisés pour les mesures ont peu ou pas de bois de réaction. La largeur des cernes annuels a ensuite été mesurée le long de chaque rayon sous une loupe binoculaire (grossissement de 40 X) avec une table micrométrique Velmex (précision de 1 μm) dont les mesures sont encodées et enregistrées sur ordinateur ou bien mesurés à partir d'images numérisées à 4800 points par pouce à l'écran d'un ordinateur à l'aide des logiciels OSM 3 (SCIEM, 2007) et LignoVision (RINNTECH, 2006).

L'utilisation de 2 rayons pour chaque coupe transversale permet de représenter la croissance concentrique sur l'ensemble de la coupe et d'éviter les erreurs de datation. Afin de valider la datation entre les deux rayons de chaque section transversale de tronc, les cernes pâles ont été utilisés. Les cernes pâles ont des cellules de bois final avec des parois minces sur l'ensemble du cerne dont la cause est généralement des températures anormalement basses à la fin de la saison de croissance (Filion *et al.*, 1986). Pour les tiges mortes immergées, la datation est faite avec le logiciel PAST4 (SCIEM, 2007), qui permet à la fois de faire les corrélations avec les tiges vivantes du même site et de valider visuellement la datation avec les courbes de croissance.

D'autre part, il est primordial de valider la datation et les séries de largeurs de cernes avec des corrélations. Ce procédé de validation en dendrochronologie se nomme l'interdatation et permet de calculer la corrélation entre les valeurs des différentes séries de mesures et de détecter les anomalies dans la datation faite. Le logiciel utilisé, COFECHA (Holmes, 1983), fait cette vérification en segmentant les séries en périodes qui se chevauchent en fonction d'une longueur prédéfinie et en calculant la corrélation entre les valeurs de ces séries.

4.3 Mesures anatomiques

La mesure des trachéides d'arbres du site immergé E-K20 s'est faite sur la période de 1960 à 1990 à partir d'un système d'imagerie numérique (Jagels et Telewski, 1990). Tout d'abord, les coupes transversales à 50 cm ayant peu ou pas de bois pourri et de bois de réaction ont été sélectionnées afin d'analyser des rayons représentatifs d'une croissance concentrique et de faciliter la fabrication des coupes minces. Au total, quatre coupes ont été sélectionnées pour la mesure des trachéides : deux coupes transversales d'arbres morts immergés et deux coupes transversales d'arbres d'intérieur vivants au moment de l'échantillonnage. Les coupes choisies d'arbres immergés morts sont les seules parmi celles qui étaient disponibles dont la croissance ne s'est pas arrêtée avant 1990 et qui n'ont pas de bois pourri ou de réaction empêchant la mesure des trachéides. Les rayons ont été coupés avec une scie à bande en segments d'une largeur moyenne de 4 mm et d'une longueur moyenne de 2 cm. Les segments ont été bouillis dans l'eau chaude pendant 5 heures et tranchés en coupes minces de 20 μm d'épaisseur à l'aide d'un microtome rotationnel électronique H340E de Thermo Scientific. Les coupes minces ont été colorées à la safranine, coincées entre des lames de verre et chauffées au four à 60°C pendant 12 heures afin d'enlever toute bulle d'air (Wang *et al.*, 2002 ; Schweingruber, 2007 ; Cournoyer, 2010)

La prise des photos des coupes minces s'est faite au microscope (grossissement 100 X) avec le système d'imagerie numérique Zeiss AxioPlan AxioCam HRC et le logiciel Zeiss AxioVision 3. Une fois le logiciel calibré, les coupes ont été numérisées (1 pixel = 0.33 μm) et les caractéristiques des trachéides mesurées (μm) avec le logiciel Zeiss AxioVision 4.3 LE. Le nombre de trachéides a été mesuré le long d'une file radiale, c'est-à-dire en suivant une suite de trachéides du début du cerne jusqu'à la fin du cerne. La contrainte en temps et l'objectif exploratoire de la démarche justifient la mesure sur une seule file radiale. Les paramètres mesurés sont le nombre de trachéides de bois final et initial, la largeur du bois initial et final et la largeur totale du cerne (Figure 4.4). La première cellule du bois final a été déterminée à partir de la formule de Mork (Denne, 1989) qui définit la première trachéide de bois final ayant une double paroi d'une épaisseur, qui lorsque multipliée par 2, est égale ou supérieure au diamètre radial du lumen de la trachéide.

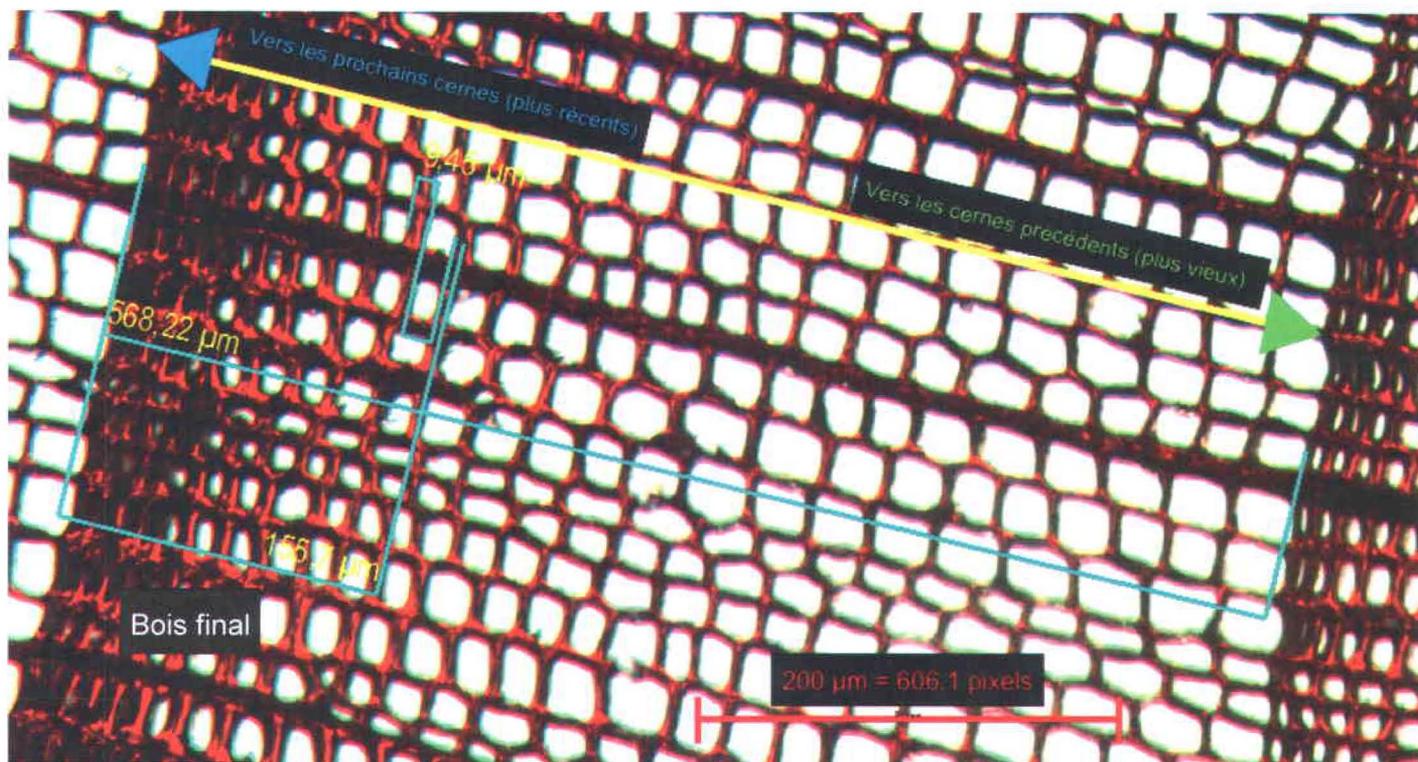


Figure 4.4 Mesures anatomiques prises pour chaque cerne le long d'une file radiale entre 1960 et 1990 avec le logiciel AxioVision 4.3 LE. 1 pixel = 0,33 μm

4.4 Standardisation et analyses

La standardisation est un traitement statistique qui a pour but d'éliminer des séries mesurées le signal de croissance relié à l'âge de l'arbre et de faciliter la comparaison de ces différentes séries par une transformation des valeurs en indices de dimension uniforme (Fritts, 1976). Le signal relié à l'âge est expliqué par la diminution avec l'âge de la croissance radiale de l'épinette noire. Tel qu'expliqué par Nicault *et al.* (2010), lors de la phase juvénile, la tige connaît une croissance rapide qui est proportionnelle à sa capacité photosynthétique. Une fois la maturité reproductive atteinte, la masse foliaire et la production ligneuse se stabilisent, alors que le diamètre de la tige continue d'augmenter annuellement. Puisque la quantité annuelle de xylème produite est ajoutée sur un diamètre croissant, la largeur des cernes montre une tendance à la baisse avec l'âge. À la sénescence, la masse foliaire ne suffit plus à la croissance et l'arbre atteint la morbidité. Ainsi, la standardisation minimise l'effet des phases de développement de la tige dans l'étude de la variation de la croissance, rendant plus facile l'extraction du signal climatique et/ou environnemental (compétition, climat, nutrition et ensoleillement) (Nicault et al., 2010).

La méthode de standardisation choisie pour l'ensemble des séries de largeurs de cernes est celle par lissage avec une régression linéaire locale de type LOWESS. Ce type de standardisation convient aux forêts fermées dynamisées par des perturbations de faible étendue et permet de conserver les variations de moyennes et hautes fréquences en définissant une fenêtre de lissage. Considérant que la période étudiée est de moins de 100 ans et que l'objectif de l'étude est d'évaluer s'il y a modification de la croissance due à une perturbation abrupte des niveaux d'eau ayant eu lieu dans les dernières 50 années, cette technique s'avère appropriée. La régression de LOWESS utilise pour chaque valeur x_i un voisinage représenté par un pourcentage n , défini par un paramètre de lissage, variant entre 0 et 1. Si le paramètre s'approche de 0, le voisinage couvert est petit et trop sensible, alors qu'une valeur de 1 couvre l'ensemble de la période, résultant en une droite d'ajustement linéaire. Puisque la période de croissance étudiée est relativement courte, le paramètre de lissage choisi est de 0.4. Par ailleurs, les mesures anatomiques ont été standardisées et indicées à l'aide d'une droite d'ajustement linéaire, puisque les mesures présentaient peu de variation dans le temps (Wang *et al.*, 2002).

Les séries individuelles de tous les échantillons prélevés à 50 cm et 4 m du sol dans les sites principaux et dans le site immergé ont été standardisées à l'aide du module bioindic (Guiot et Gally, 2013) sous *R-Project* (R Core Team, 2012). Une série moyenne indicée a été construite pour chaque combinaison de hauteur d'échantillonnage et de position des tiges, résultant en 4 séries moyennes indicées par site (2 hauteurs x 2 milieux), pour un total de 28 séries moyennes pour l'ensemble des six sites principaux, plus le site immergé (7 sites x 4 séries par site). Chaque série moyenne indicée a été construite à partir des séries individuelles à l'aide de la moyenne robuste à double pondération avec le module *detrendeR* (Campelo *et al.*, 2012), permettant de minimiser l'effet de valeurs anormales au sein d'une population (Cook, 1985 ; Lebourgeois et Mérian, 2012).

4.4.1 Statistiques et analyses

Le module *detrendeR* a aussi été utilisé pour obtenir les statistiques descriptives ajoutées en Annexe (âge moyen, largeur moyenne du cerne, écart-type, sensibilité moyenne, auto-corrélation de premier ordre, EPS). La sensibilité moyenne est décrite comme le pourcentage moyen de changement entre la largeur d'un cerne et celle du suivant, calculée en divisant la valeur absolue de la différence entre une paire de valeurs consécutives par la valeur moyenne de ces valeurs et en faisant une moyenne des quotients pour toutes les paires d'une série (Fritts, 1976). La valeur obtenue pour la sensibilité moyenne varie entre 0 et 2: une valeur de 0 indique deux cernes successifs égaux, tandis qu'une valeur de 2 indique que l'épaisseur d'un des deux cernes est nulle (Lebourgeois et Mérian, 2012). Les courbes de sensibilité moyenne élaborées pour la section Résultats ont été lissées à l'aide d'une moyenne mobile de sept ans afin de mettre en évidence la tendance en croissance sur une courte période plutôt que les fluctuations annuelles (Denneker *et al.*, 2008).

L'EPS (*Expressed Population Signal*) évalue la représentativité des individus au sein d'une population échantillonnée à partir des séries de largeurs de cernes. Une valeur de 0 indique que les individus sont indépendants (ie. pas d'une même population), alors qu'une valeur de 1 indique que les individus sont identiques (ie. d'une même population) (Fritts, 1976).

Afin d'évaluer la variation dans la croissance entre les épinettes noires d'intérieur et les épinettes noires riveraines, un ratio a été élaboré. Ce ratio est calculé en divisant la croissance moyenne brute des tiges riveraines par la croissance moyenne brute des tiges d'intérieur (forêt). Un ratio égal à 1 indique une croissance égale entre la rive et la forêt, alors qu'un ratio inférieur à 1 indique une croissance en forêt supérieure et un ratio supérieur à 1 une croissance supérieure sur la rive.

5 RÉSULTATS

Les différentes analyses effectuées entre les arbres riverains et les arbres d'intérieur (intrasite), entre les arbres riverains des différents sites principaux (intersite) et les deux hauteurs de coupe échantillonnées sur chaque arbre (intraarbre) ne révèlent pas d'effet de la variation de niveau d'eau des lacs sur la croissance.

5.1 Conditions de croissance des arbres sur la rive et des arbres d'intérieur

Le premier niveau d'analyse de croissance consiste à comparer la croissance des arbres riverains à celle des arbres d'intérieur. Le ratio annuel entre la croissance moyenne brute à la rive et la croissance moyenne brute à l'intérieur (Figure 5.1) ne montre pas de changement attribuable à la variation de niveau d'eau causée par la construction des routes et des digues en 1977, tant pour les séries moyennes faites à partir des coupes à 50 cm du sol que celles faites à partir des coupes à 4 m du sol.

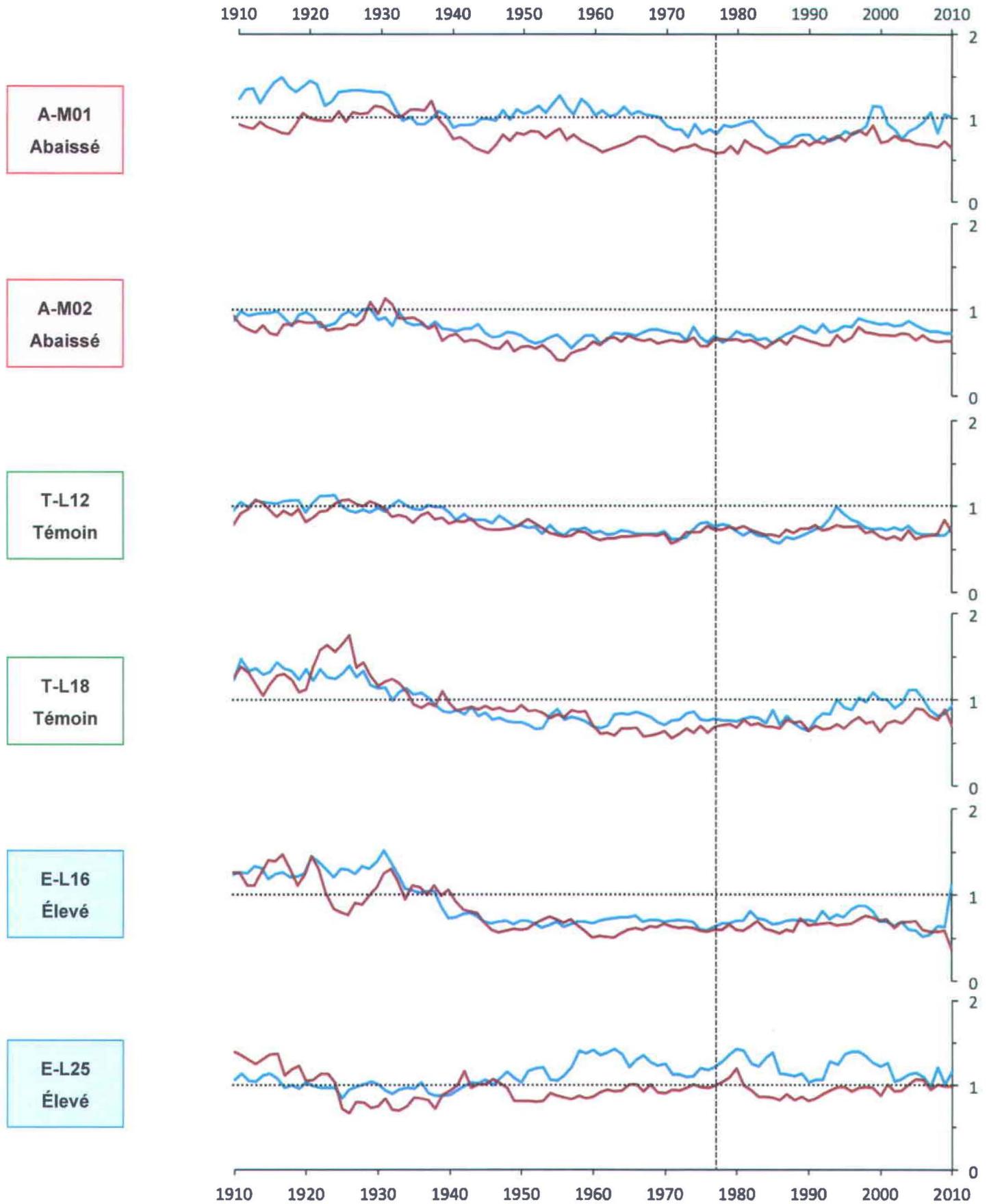


Figure 5.1

Ratio entre la série moyenne brute des arbres sur la rive et celle des arbres d'intérieur (en bleu : coupes à 50 cm du sol ; en rouge : coupes à 4 m du sol). Ligne pointillée verticale = construction de la route/digues (1977).

Les séries moyennes indicées et les courbes de sensibilité moyenne à 50 cm du sol des arbres sur la rive et des arbres d'intérieur pour chaque site ont été comparées (Figure 5.2 et 5.3). Ces deux types de courbes ne démontrent pas de différence dans la croissance entre les arbres d'intérieur et sur la rive après la construction des digues et des routes en 1977.

Tableau 5.1 **Corrélation de Pearson ($P < 0,005$) entre la série moyenne indicée sur la rive et à l'intérieur à 50 cm du sol pour la période 1977-2010.**

Site	Corrélation
A-M01	0.65
A-M02	0.80
T-L12	0.79
T-L18	0.73
E-L16	0.74
E-L25	0.58

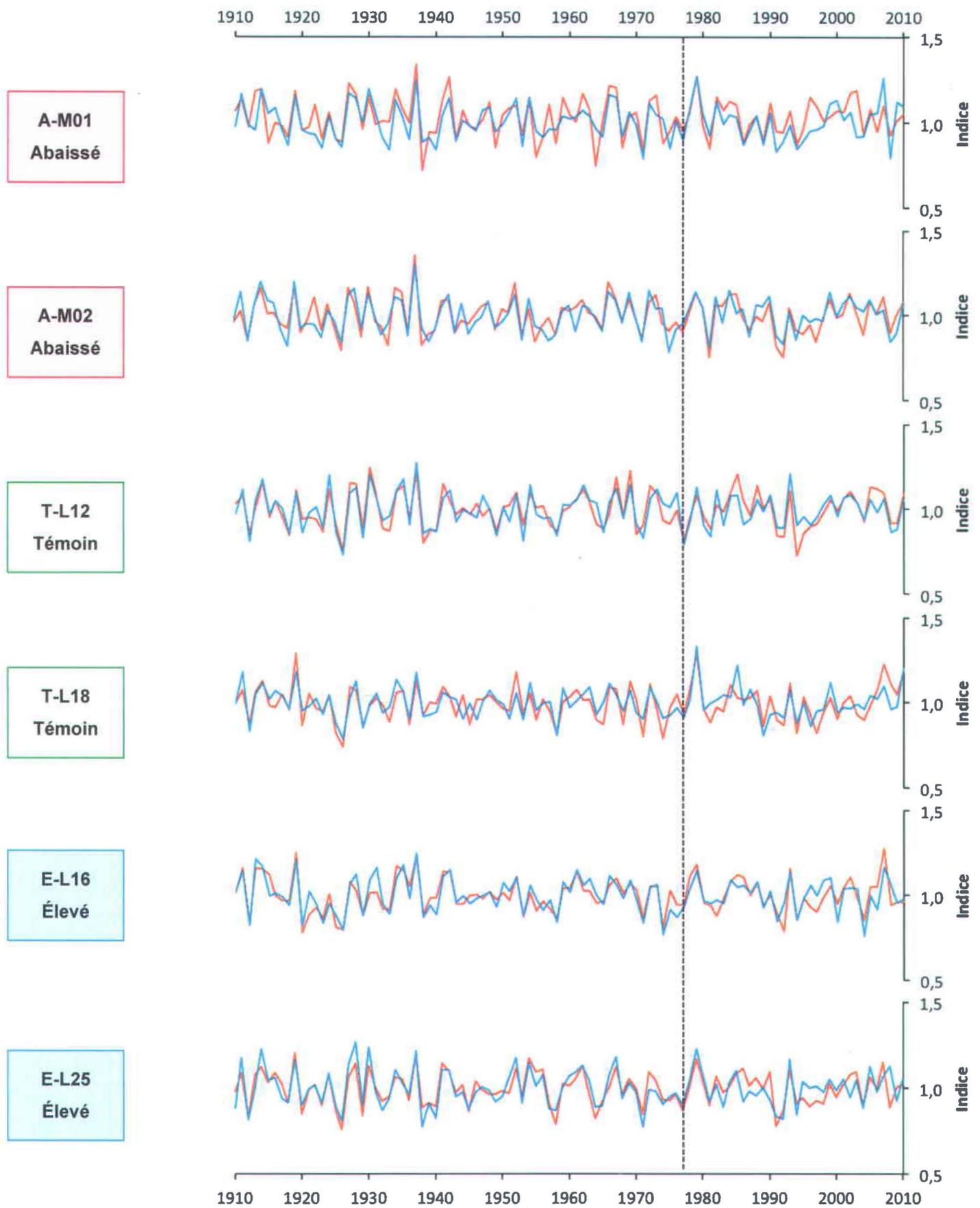


Figure 5.2

Croissance moyenne indicée à 50 cm du sol des arbres sur la rive (bleu) et d'intérieur (orange). Ligne pointillée = construction de la route/digues (1977).

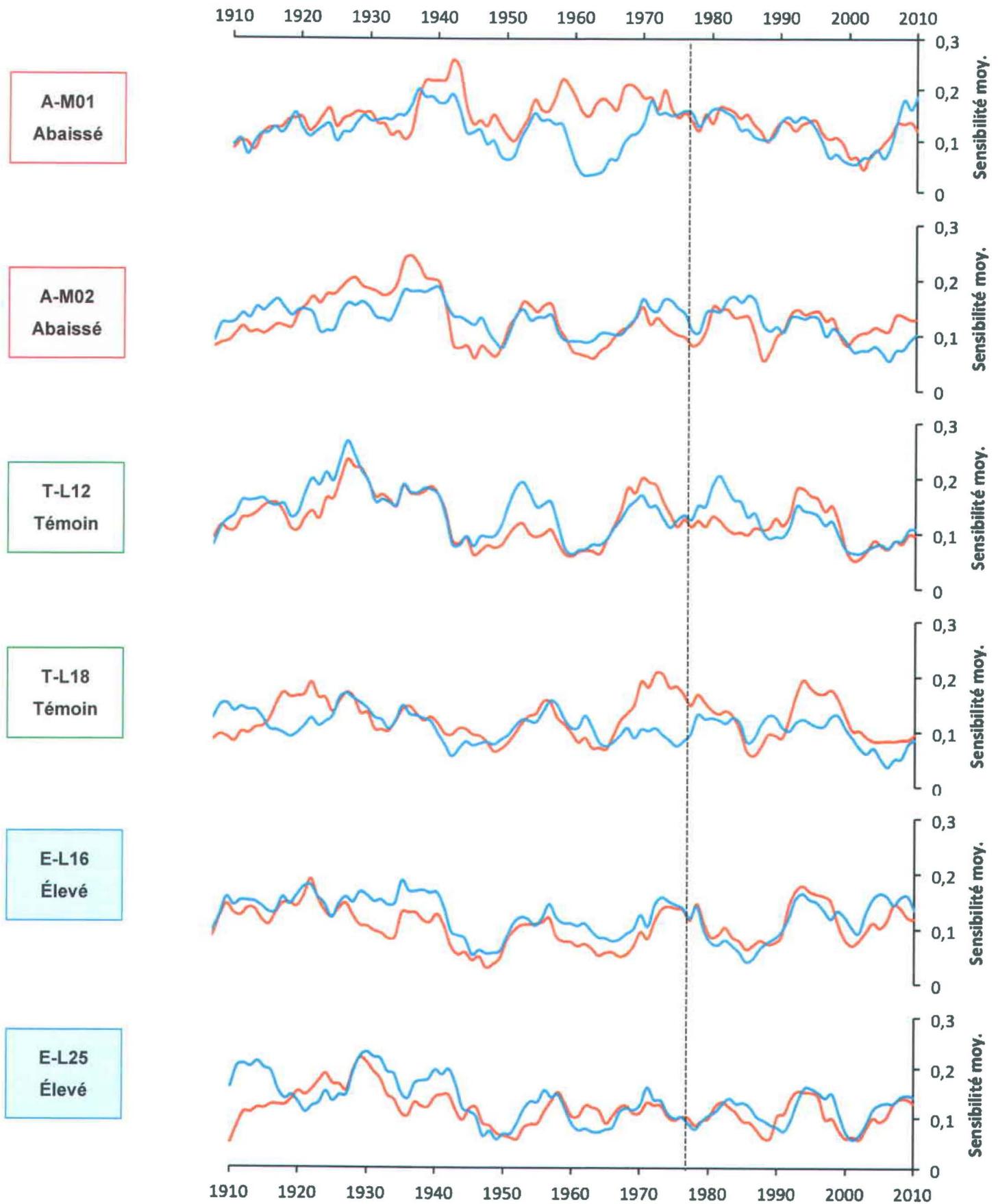


Figure 5.3

Sensibilité moyenne des séries moyennes à 50 cm du sol des arbres sur la rive (bleu) et d'intérieur (orange). Ligne pointillée = construction de la route/digues (1977).

5.2 Conditions de croissance riveraine selon la variation de niveau d'eau

Le deuxième niveau d'analyse de croissance compare la croissance des arbres riverains des lacs dont le niveau d'eau a été abaissé et élevé par la construction des routes et des digues en 1977 aux lacs dont le niveau d'eau est demeuré inchangé. Cette comparaison permet de vérifier que les résultats obtenus dans la comparaison intrasite ne sont pas causés par un effet local de la variation de niveau d'eau sur chacun des sites.

Les courbes de croissance des séries moyennes indicées (Figure 5.4) des arbres à la rive ne démontrent pas de différences en croissance attribuable à la construction des routes et des digues en 1977. Les hausses de croissance importantes de 1979 et 1993 sont retrouvées pour toutes les séries. Les courbes de sensibilité moyenne confirment l'absence de changement significatif dans la croissance causée par la variation du niveau d'eau (Figure 5.5). Seul le site E-L16 dont le niveau d'eau a été élevé se démarque des autres sites pour la période de 1980-1987, alors que la sensibilité baisse en dessous de 0,1. Ceci indique que la variation de la croissance d'année en année pour cette période a diminué. Toutefois, la courbe de croissance indicée pour ce site ne se démarque pas des autres sur la Figure 5.4.

Les corrélations de Pearson ($P < 0,05$) ont été calculées entre les séries moyennes indicées à 50 cm du sol des sites dont le niveau d'eau a été affecté et celles des sites témoins (Tableau 5.2). Seul le site abaissé A-M02 corrèle mieux avec le site témoin le plus proche ($r = 0,74$ pour T-L12 contre $r = 0,37$ pour T-L18), alors que la différence en corrélation pour les autres sites avec les sites témoins est inférieure à 10%.

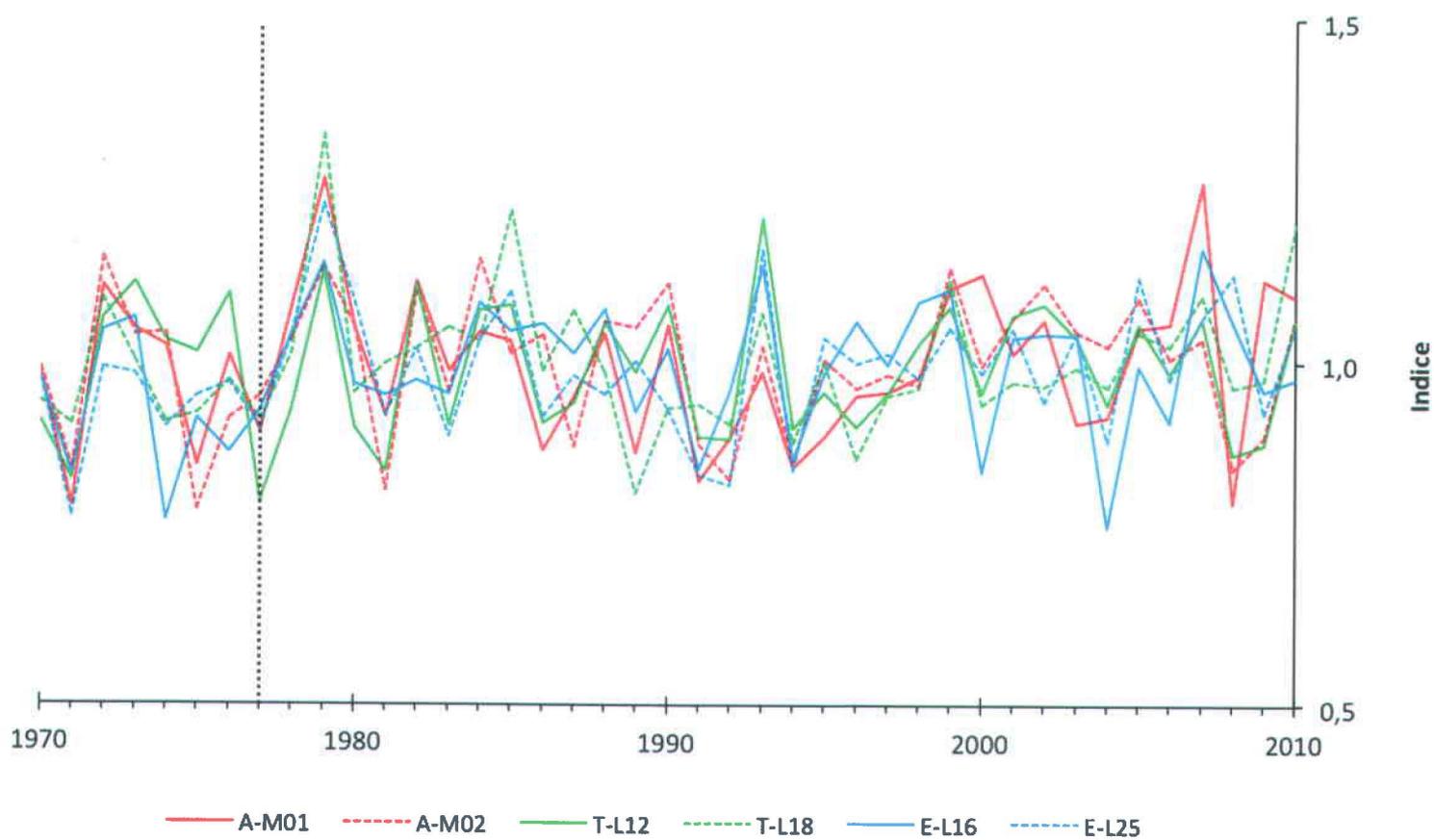


Figure 5.4 Croissance moyenne indicée des coupes à 50 cm du sol des arbres sur la rive pour les sites dont le niveau d'eau a été abaissé (rouges), élevé (bleus) et est demeuré inchangé (verts). Ligne noire pointillée = construction de la route/digues (1977).

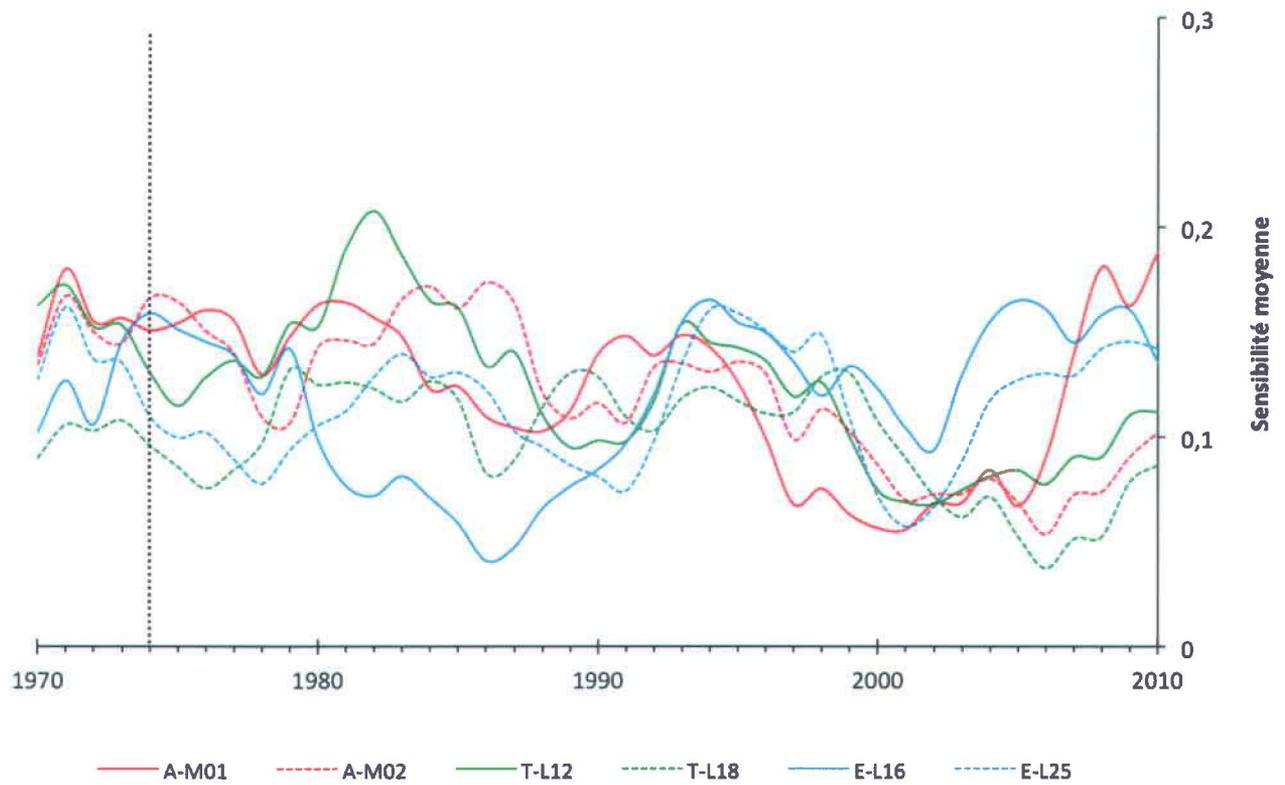


Figure 5.5 Sensibilité moyenne des coupes à 50 cm du sol des arbres sur la rive pour les sites dont le niveau d'eau a été abaissé (rouges), élevé (bleus) et demeuré inchangé (verts). Ligne noire pointillée = construction de la route/digues (1977).

Tableau 5.2 Corrélation de Pearson ($P < 0,05$) entre la croissance moyenne indiquée des arbres sur la rive (coupe à 50 cm), la distance et l'orientation par rapport aux sites témoins (1977-2010).

	T-L12		T-L18	
	Indicées	Distance (km) / orientation	Indicées	Distance (km) / orientation
A-M01	0.56	34 NE	0.60	152 NE
A-M02	0.74	37 NE	0.37	154 NE
T-L12	-	-	0.53	131 NE
T-L18	0.53	131 SO	-	-
E-L16	0.56	91 SO	0.46	52 E
E-L25	0.58	35 SE	0.60	136 E

5.3 Croissance dans la tige selon la hauteur de coupe

La croissance des échantillons recueillis à 4 m du sol dans la présente étude s'associe à celle des échantillons qui pourraient être utilisés dans le cadre des reconstitutions hydroclimatiques millénaires. Ainsi, les courbes de croissance indicées des coupes à 50 cm et 4 m du sol des épinettes noires riveraines ont été comparées et corrélées (Tableau 5.3 et Figure 5.6). Elles révèlent peu de différence au niveau de la croissance entre les deux hauteurs, tant pour les épinettes sur la rive que pour les épinettes d'intérieur.

La corrélation de Pearson ($P < 0,01$) entre les séries moyennes indicées à 50 cm et du 4 m du sol pour les arbres à la rive et en forêt pour la période de 1977-2010 a été calculée (Tableau 5.3). Seul le site abaissé A-M01 a des valeurs de r inférieures à 0,60 pour les séries à la rive et en forêt. Pour les arbres sur la rive du site A-M01, la période qui influence le plus négativement la corrélation est celle entre 2006-2010 avec une valeur de -0,2. La série à 50 cm du sol connaît une baisse en croissance en 2008 alors que pour la même année, la série à 4 m du sol connaît une hausse de croissance. En excluant cette période, la corrélation augmente ($r = 0,70$). Pour les arbres en forêt, ce sont la période de 1996 à 2000 ($r = -0,54$) et la période de 2006-2010 ($r = -0,51$) qui affectent la corrélation. Si on exclut ces deux périodes, la corrélation est de 0,70.

Tableau 5.3 Corrélation de Pearson ($P < 0,01$) entre les hauteurs d'échantillonnage pour les séries moyennes indicées, en fonction de la position (rive ou intérieur) sur chaque site principal pour la période 1977-2010.

Site	Milieu	Corrélation
A-M01	Rive	0.43
	Intérieur	0.58
A-M02	Rive	0.70
	Intérieur	0.72
T-L12	Rive	0.73
	Intérieur	0.85
T-L18	Rive	0.70
	Intérieur	0.78
E-L16	Rive	0.64
	Intérieur	0.73
E-L25	Rive	0.77
	Intérieur	0.70

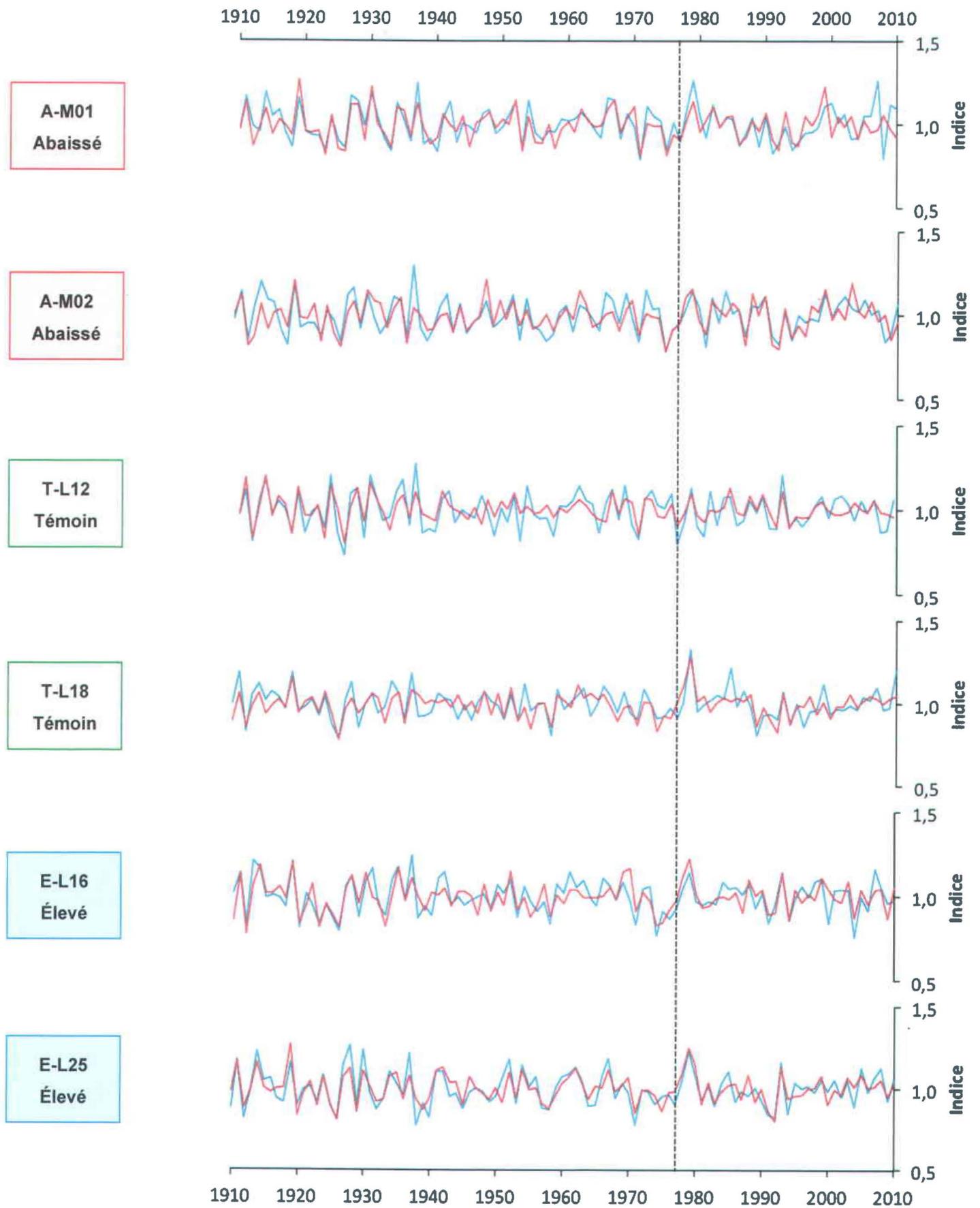


Figure 5.6

Croissance moyenne indiquée pour les arbres riverains pour deux hauteurs de coupe (en bleu: coupes à 50 cm du sol; en rouge: coupes à 4 m du sol). Ligne pointillée = construction de la route/digues (1977).

5.4 Conditions de croissance selon les conditions d'immersion

Les derniers cernes de croissance des 16 tiges immergées échantillonnées sont en décomposition, limitant la fin de la chronologie moyenne des coupes transversales à 50 cm du sol à l'année 1997 et celles à 4 m du sol à l'année 2003 (Annexe, Tableau 9.2 et Figure 9.2). Les courbes de croissance démontrent peu de différence dans la croissance pour l'ensemble des tiges entre les deux hauteurs d'échantillonnage.

Le ratio entre la série moyenne brute des arbres immergés et la série moyenne brute des arbres d'intérieur diminue pour les coupes à 4 m du sol après 1974, indiquant que la croissance des arbres d'intérieur est plus importante que celle des arbres morts immergés pour cette période (Figure 5.7). Au contraire, la croissance rapportée par les coupes à 50 cm du sol des arbres morts immergés est plus importante.

Les courbes moyennes indicées des coupes à 50 cm du sol des arbres morts immergés (Figure 5.10) et des arbres d'intérieur (Figure 5.11) démontrent une forte hausse de croissance en 1975 absente chez les coupes à 4 m du sol. Cette différence de croissance pour les différentes hauteurs de coupe pour les arbres immergés est présente chez les arbres d'intérieur, mais plus importante chez les arbres morts immergés. Cette augmentation particulière en croissance pour 1975 n'est pas présente chez les arbres des six autres sites (Figure 5.2, Figure 5.4 et Figure 5.6). Le rapport entre la croissance brute des arbres morts immergés et des arbres d'intérieur rapporte cette différence dans la croissance (Figure 5.7). La hausse en croissance observée chez les arbres immergés à 4 m du sol à la fin de leur période de vie (après 1997) ne doit pas être considérée, car elle représente une seule tige.

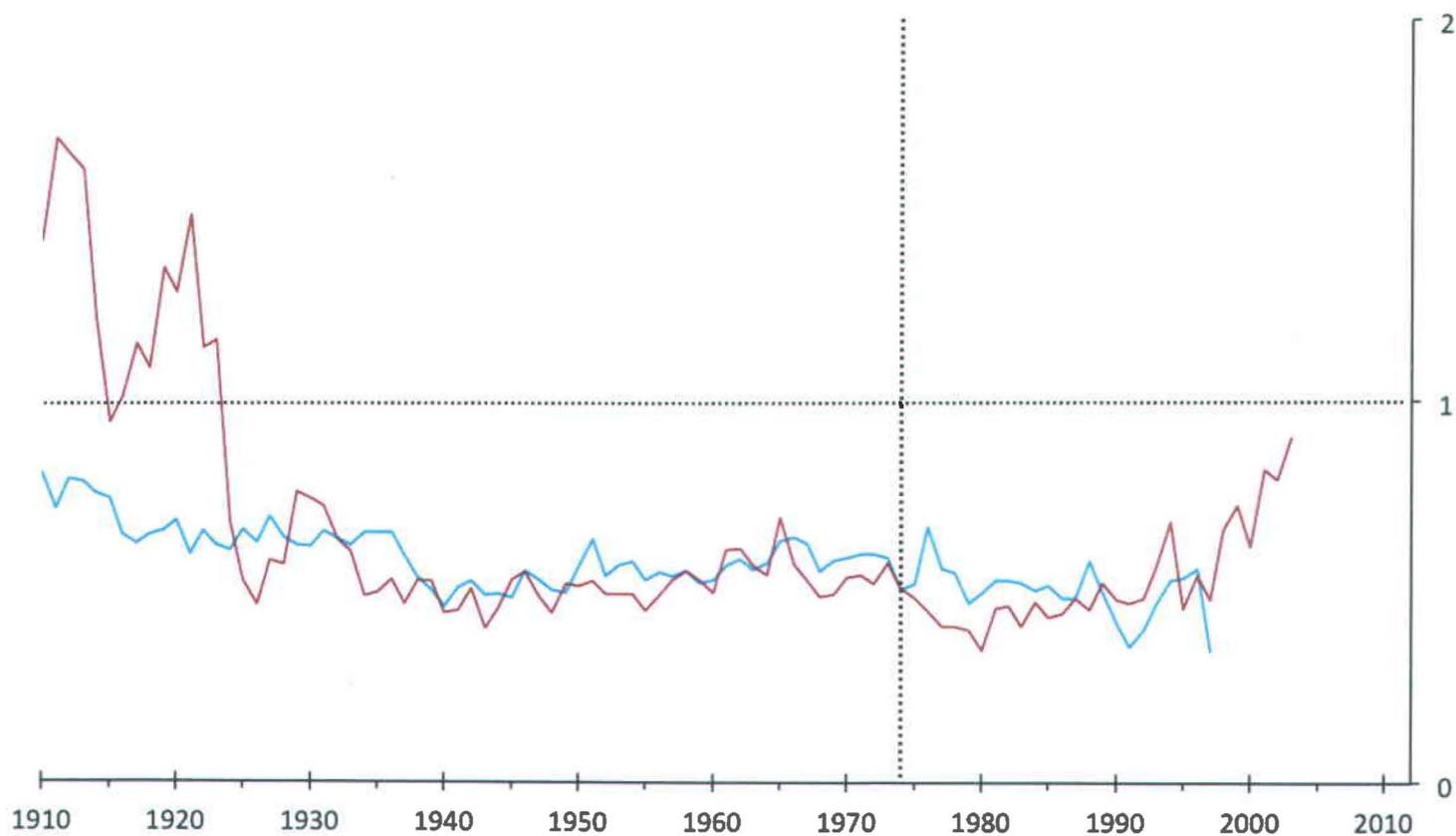


Figure 5.7 Ratio entre la série moyenne brute des arbres morts immergés et la série moyenne brute des arbres d'intérieur (en bleu : coupes à 50 cm du sol ; en rouge : coupes à 4 m du sol). Ligne pointillée verticale = construction de la route (1974).

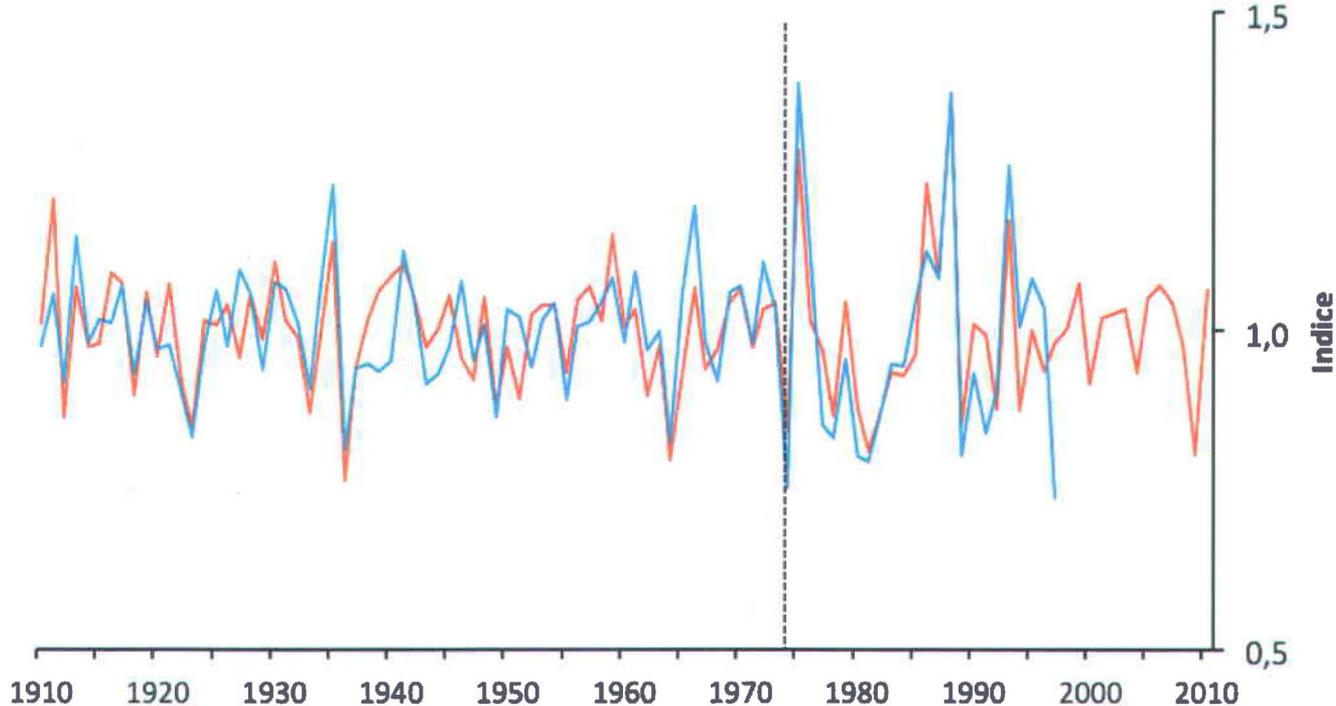


Figure 5.8 Croissance moyenne indicée à 50 cm des arbres morts immergés et d'intérieur (bleu : immergés ; orange : intérieur). Ligne pointillée = construction de la route (1974).

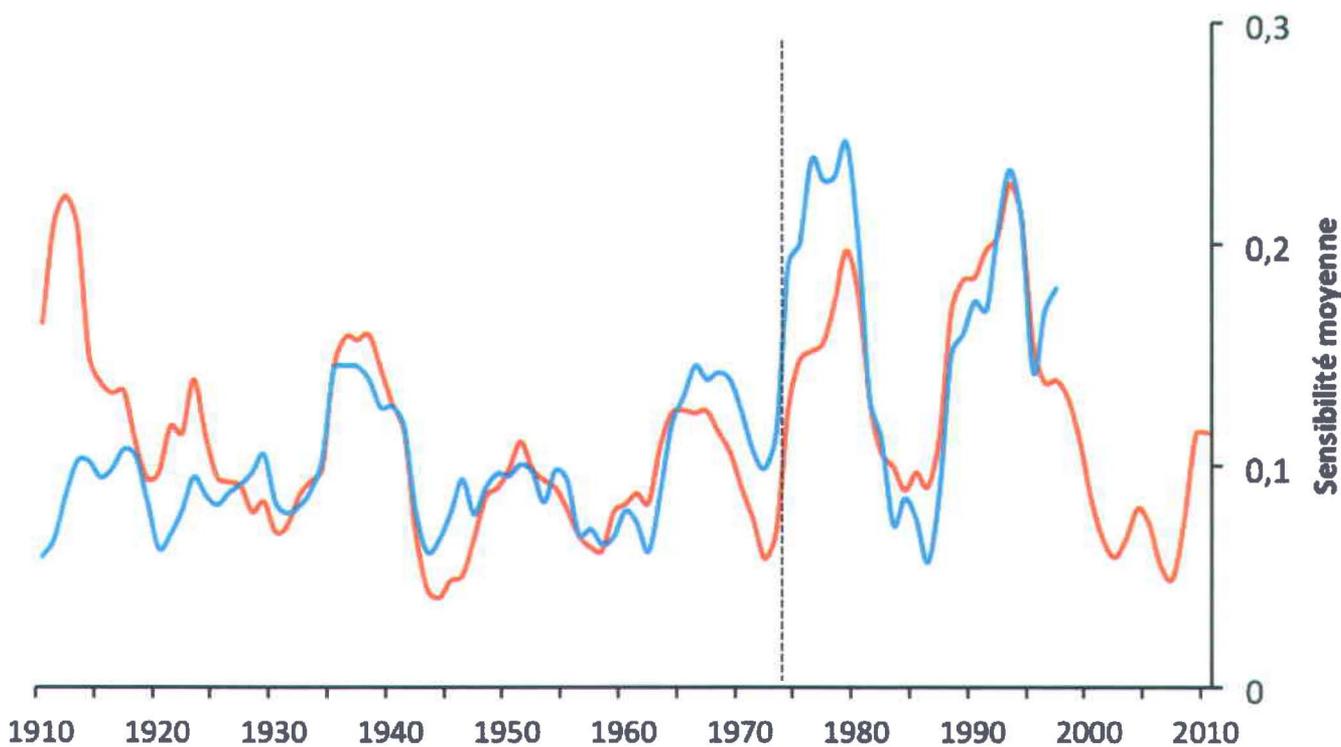


Figure 5.9 Sensibilité moyenne des séries moyennes à 50 cm des arbres morts immergés et d'intérieur (bleu : immergés ; orange : intérieur). Ligne pointillée = construction de la route (1974).

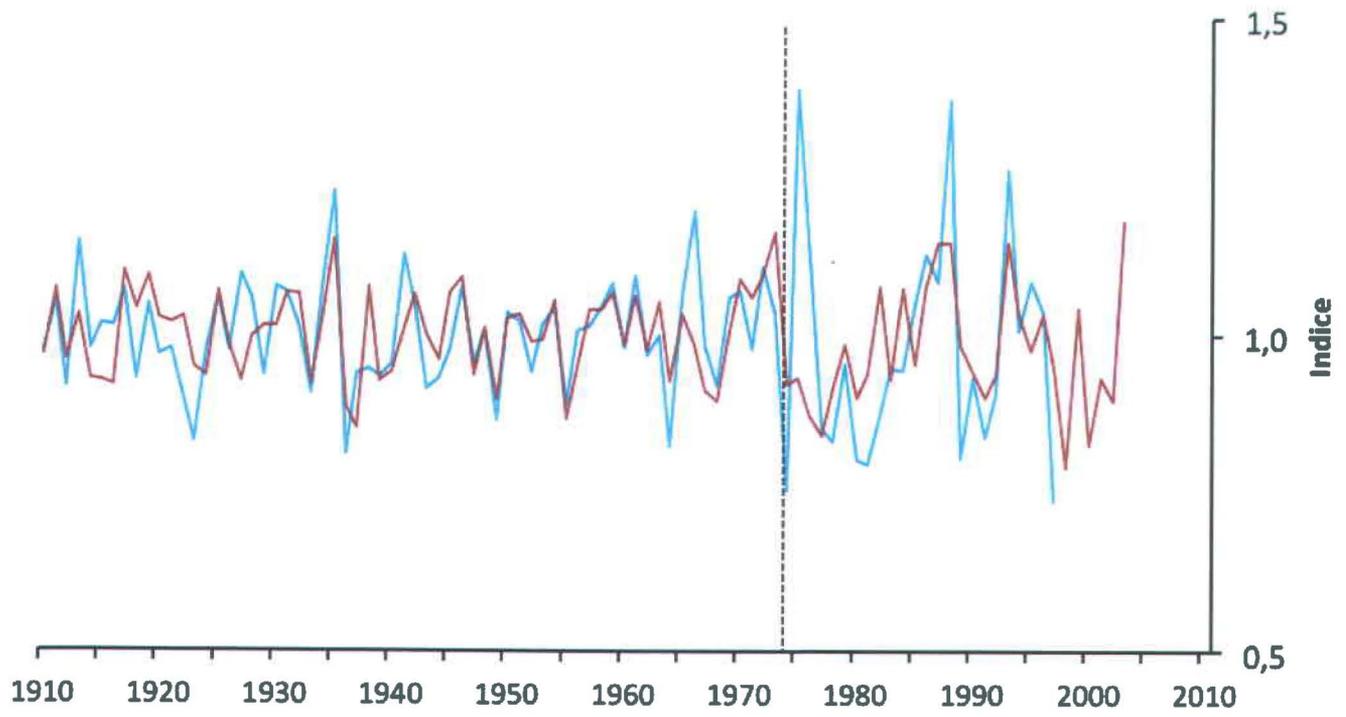


Figure 5.10 Croissance moyenne indicée à 50 cm (en bleu) et 4 m (en rouge) du sol des arbres morts immergés. Ligne pointillée = construction de la route (1974).

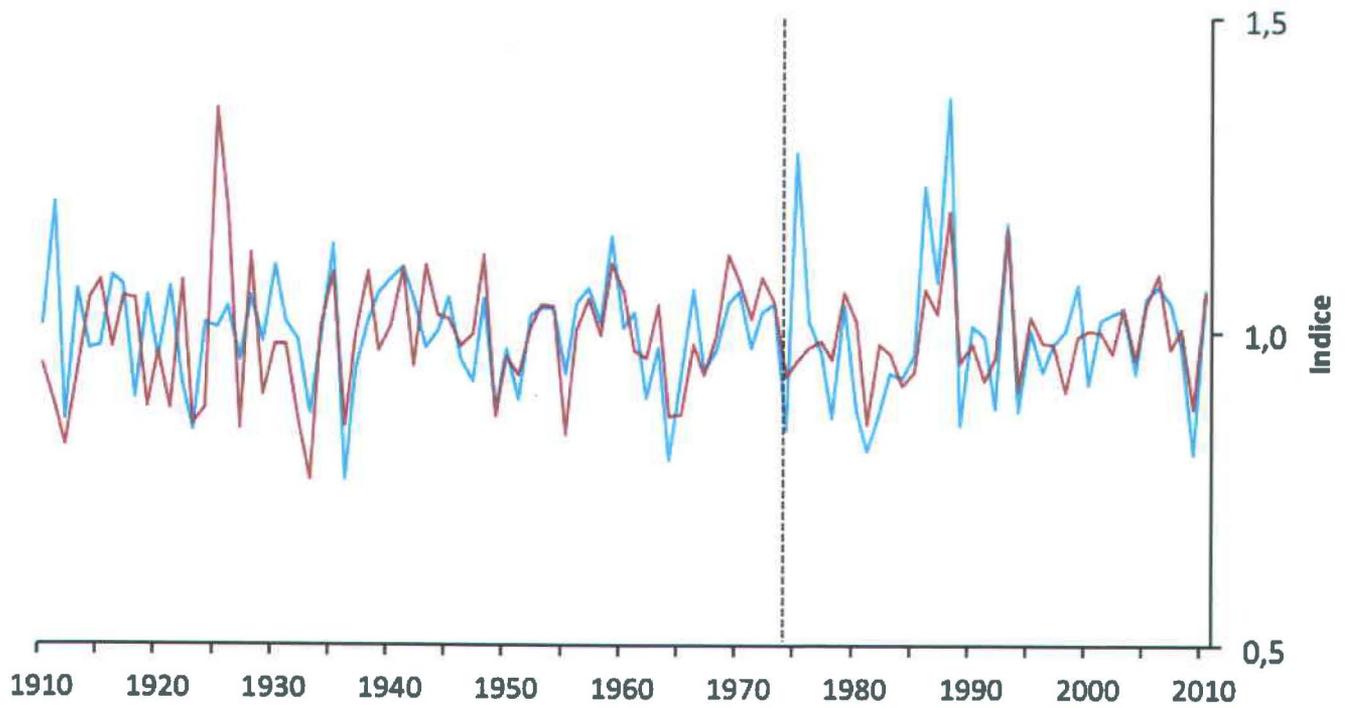


Figure 5.11 Croissance moyenne indicée à 50 cm (en bleu) et 4 m (en rouge) du sol des arbres d'intérieur. Ligne pointillée = construction de la route (1974).

5.5 Croissance anatomique selon les conditions d'immersion

Les rayons d'arbres immergés proviennent des coupes à 50 cm du sol d'un arbre mort dont la datation arrête en 1993 (arbre 3R : 241 ans) et d'un arbre mort dont la datation arrête en 1992 (arbre 8R : 98 ans). Le dernier cerne de croissance formé pour les coupes à 50 cm du sol des rayons d'arbres d'intérieur date de 2012 (arbre 1F : 74 ans et arbre 5F : 90 ans). L'analyse anatomique s'échelonne sur la période de 1960 à 1990.

Les arbres morts immergés affichent une diminution constante du nombre de trachéides après une hausse du nombre de trachéides jusqu'en 1975 (Figure 5.12). La proportion de trachéides de bois final par cerne (Figure 5.13) a augmenté pour l'ensemble des rayons après 1974. Les moyennes de la proportion de trachéides de bois final par rayon pour la période avant 1974 et après 1974 indiquent une augmentation de la proportion des trachéides de bois final après 1974 de 22% et de 5% respectivement pour les rayons des arbres d'intérieur 1F et 5F et de 22% et 11% pour les rayons d'arbres morts immergés 3R et 8R.

Une tendance similaire est observée pour la proportion de la largeur de bois final sur la largeur totale du cerne lorsque les moyennes par rayon pour la période avant 1974 et après 1974 sont comparées, indiquant une augmentation considérable (Figure 5.14). Après 1974, la proportion moyenne de la largeur de bois final sur la largeur totale du cerne pour la période de 1975-1990 par rapport à la période de 1960-1974 a haussé de 40% et de 9% pour les rayons d'arbres d'intérieur 1F et 5F et de 46% et 15% pour les rayons d'arbres morts immergés 3R et 8R. La variation des caractéristiques anatomiques du rayon de l'arbre d'intérieur 1F et l'arbre mort immergé 3R est semblable, alors que celle du rayon d'intérieur 5F et de l'arbre mort immergé 8R semblent correspondre.

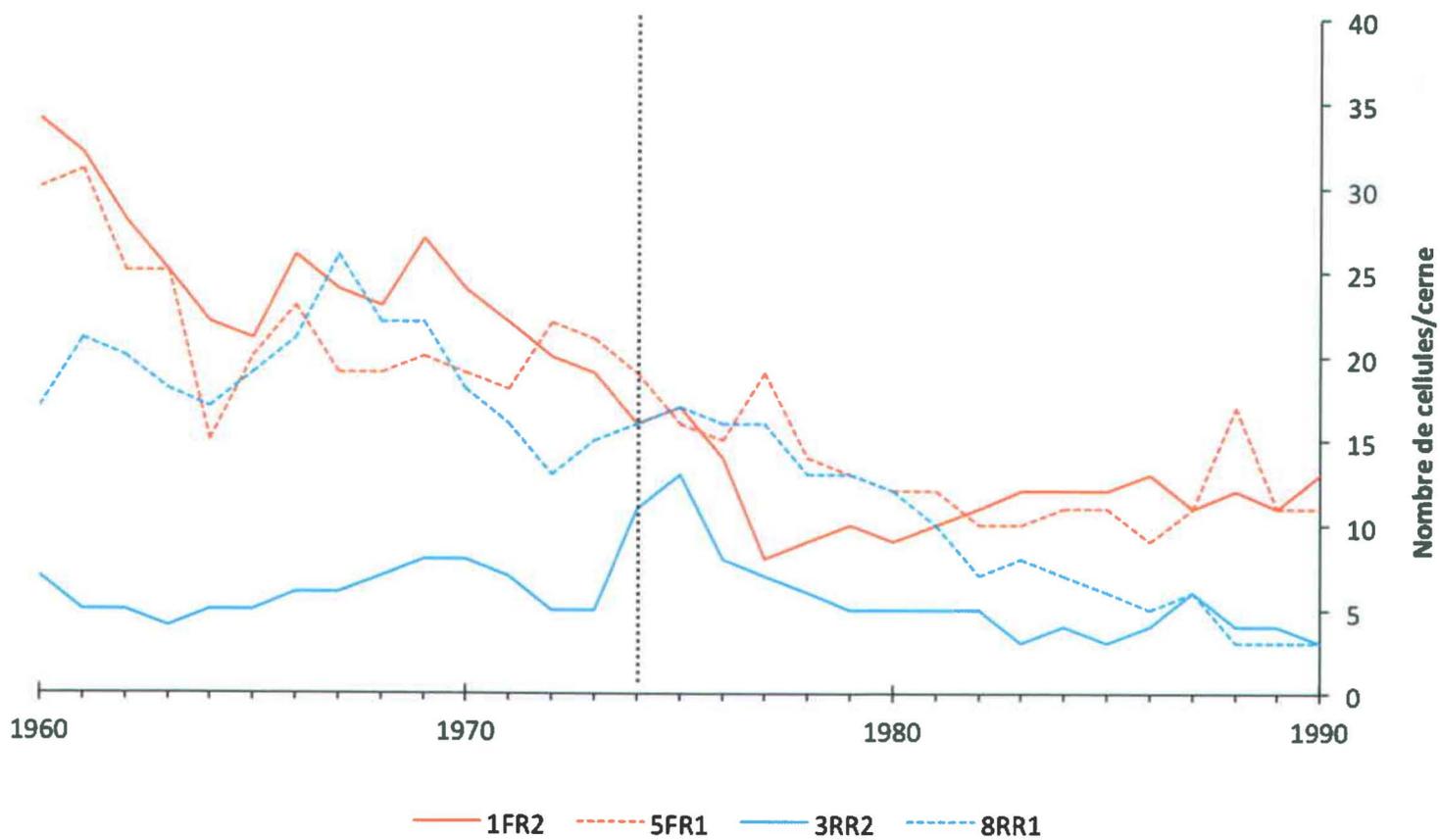
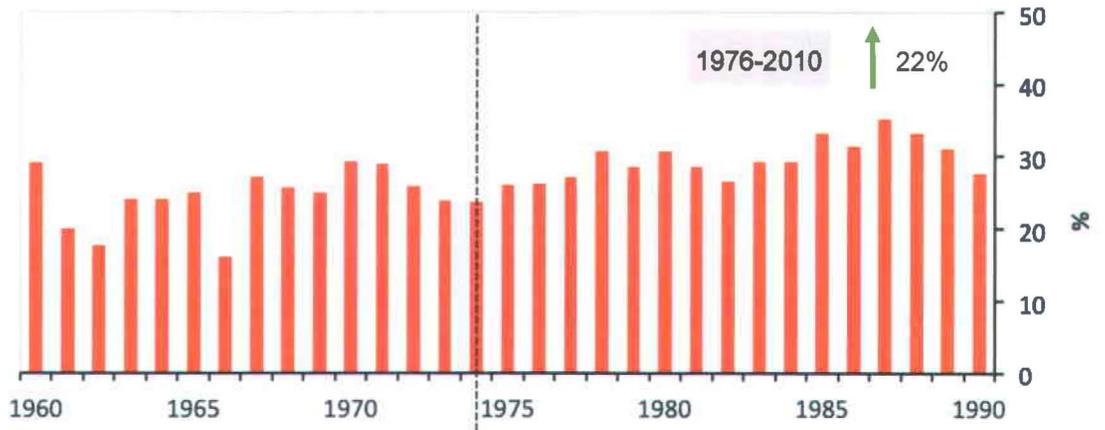
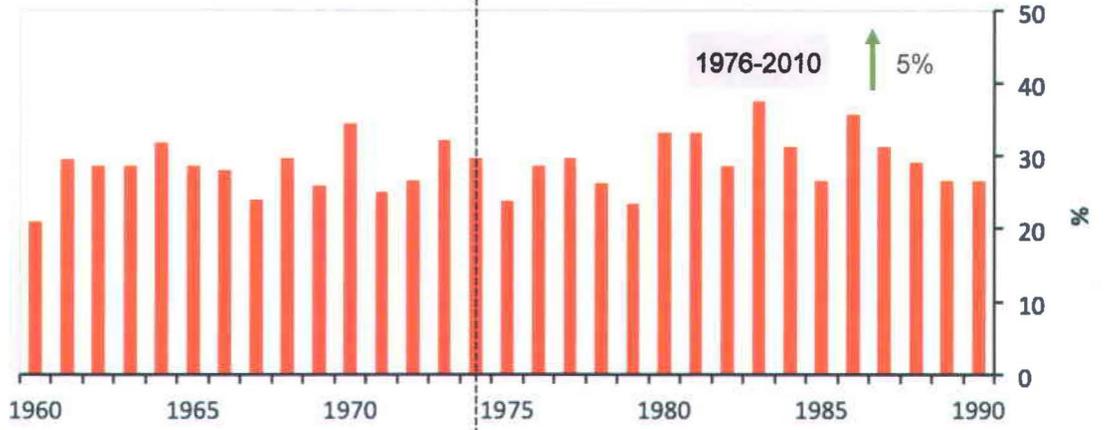


Figure 5.12 Nombre de trachéides par file radiale produites annuellement pour les rayons d'arbres morts immergés (en bleu; 3R : ligne pleine, 8R : ligne pointillée) et d'arbres d'intérieur (en orange; 1F : ligne pleine, 5F : ligne pointillée). Ligne noire pointillée = construction de la route (1974).

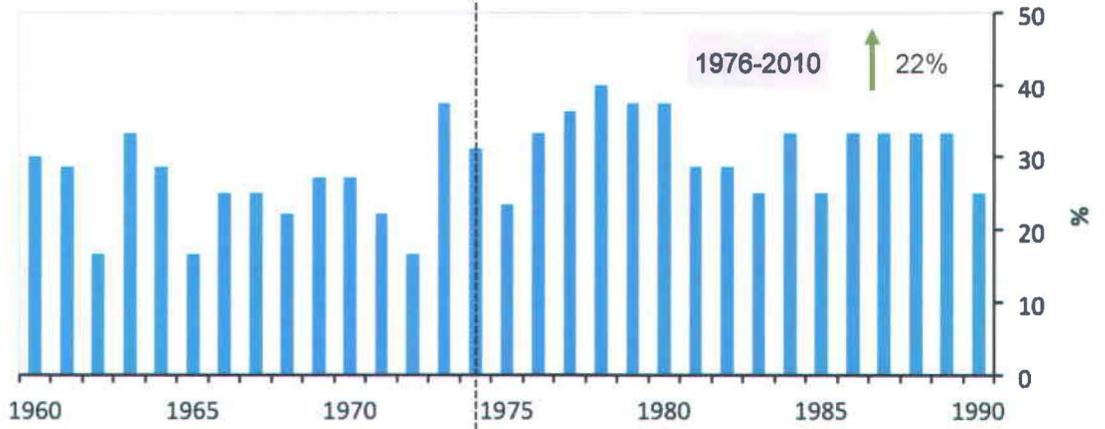
E-K20 – Intérieur
Rayon 1FR2



E-K20 – Intérieur
Rayon 5FR1



E-K20 – Immergé
Rayon 3RR2



E-K20 – Immergé
Rayon 8RR1

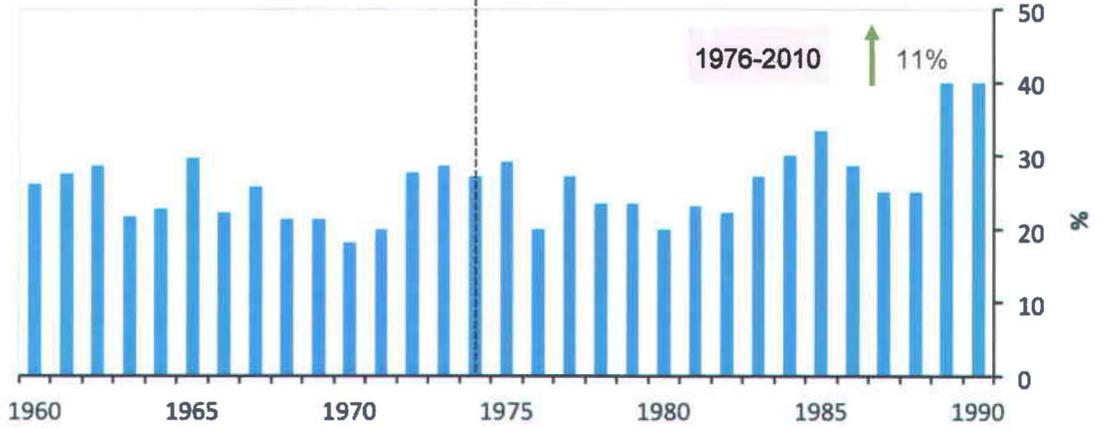
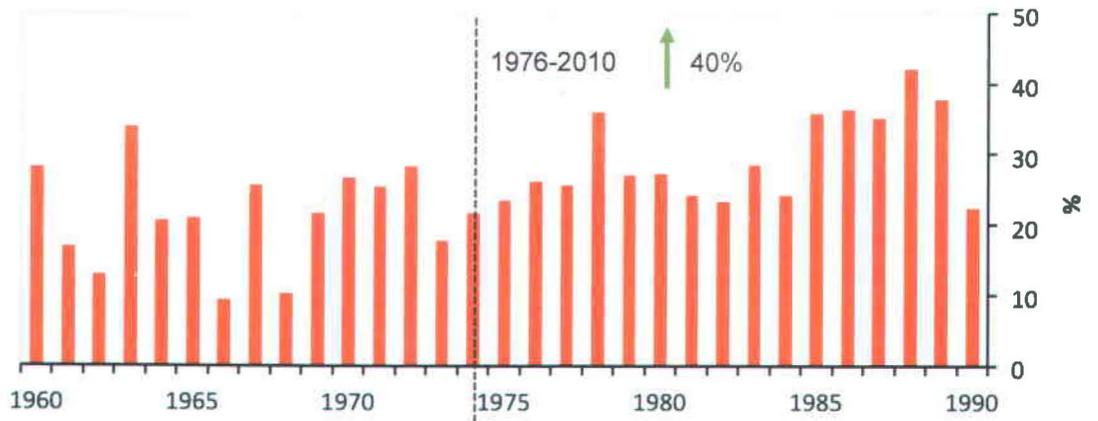
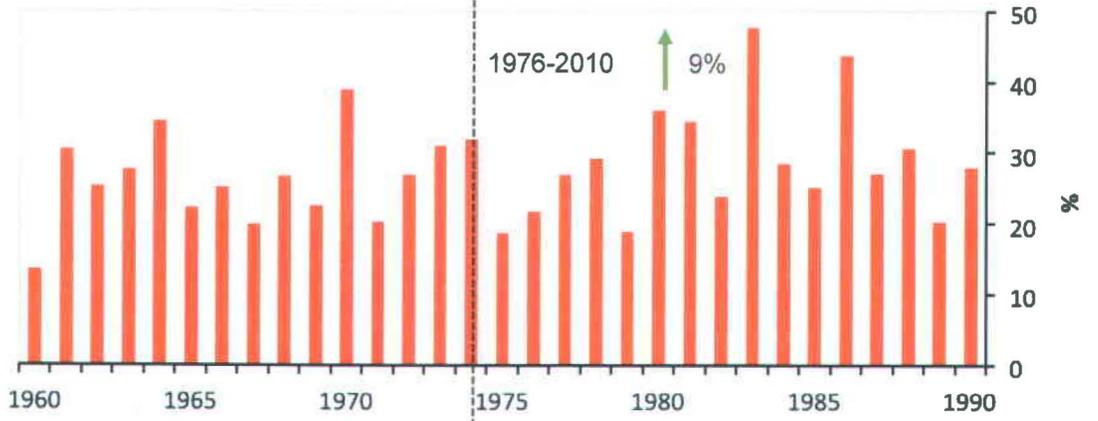


Figure 5.13 Proportion (%) de trachéides de bois final par cerne. Ligne noire pointillée = construction de la route (1974).

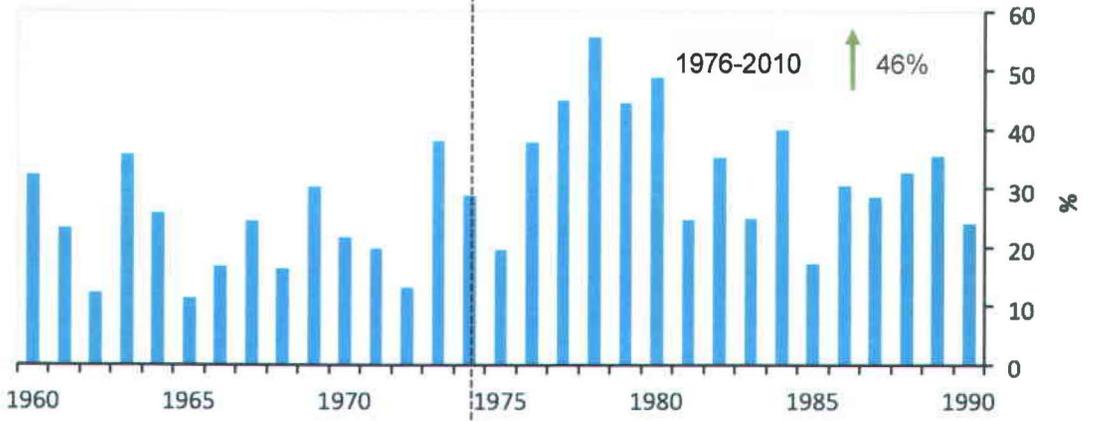
E-K20 – Intérieur
Rayon 1FR2



E-K20 – Intérieur
Rayon 5FR1



E-K20 – Immergé
Rayon 3RR2



E-K20 – Immergé
Rayon 8RR1

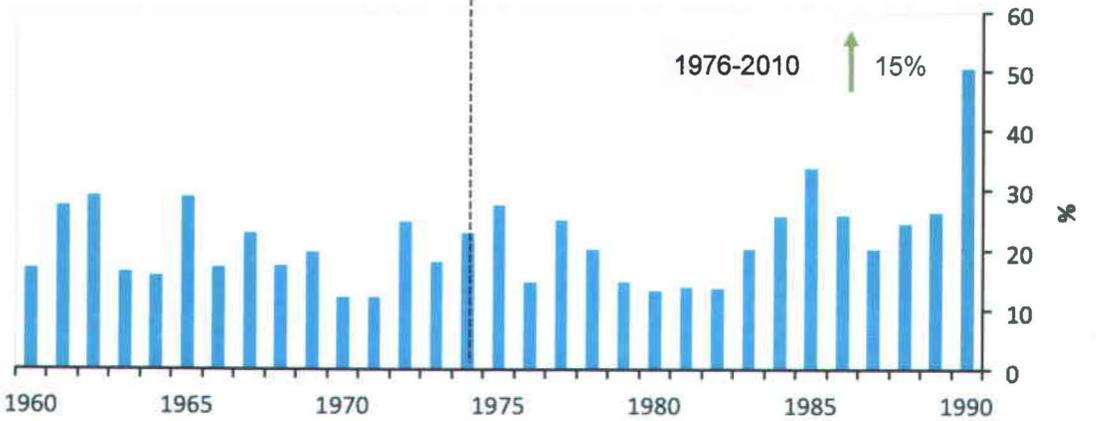


Figure 5.14 Proportion (%) de la largeur de bois final sur la largeur totale du cerne. Ligne noire pointillée = construction de la route (1974).

6 DISCUSSION

Les analyses de croissance faite sur les tiges riveraines, sur les tiges d'intérieur (en retrait en forêt) et à différentes hauteurs du sol démontrent que les variations anthropiques de niveau d'eau des lacs boréaux n'ont pas d'effet sur la croissance radiale des épinettes noires qui composent la rive. Les résultats de cette étude suggèrent que les reconstitutions hydroclimatiques faites à partir de l'épinette noire en milieu boréal n'ont pas à tenir compte d'un signal de variation de niveau lacustre, tant chez les tiges d'épinettes noires vivantes que les tiges d'épinettes noires subfossiles. Cette étude est la première faite à ce sujet et peut être une indication des résultats à obtenir avec les autres espèces utilisées dans les reconstitutions faites dans différentes régions du monde.

6.1 Tolérance des tiges riveraines aux variations lacustres

Les comparaisons intrasite et intersite démontrent l'absence de variation dans la croissance pour les épinettes noires riveraines suite à la modification des niveaux d'eau des lacs. La topographie des sites échantillonnés caractérisée par des forêts inclinées vers le lac et les résultats suggèrent que l'approvisionnement pour les tiges d'épinettes noires en eau est contrôlé en grande partie par l'écoulement en eau dans la forêt, plutôt que par les variations de niveau d'eau des lacs. Les résultats obtenus laissent supposer deux explications : 1) Le système racinaire des épinettes noires riveraines n'est pas affecté par les variations de niveau des lacs, soit celles qui n'induisent pas d'immersion prolongée. 2) La disponibilité en eau ne constitue pas un facteur limitant la croissance sur l'ensemble des sites, dû entre autres à la tolérance de l'épinette noire à une grande amplitude de conditions hydriques du sol (Lamhhamedi et Bernier, 1994; Grossnickle, 2000).

En conséquence, les résultats indiquent que les tiges échantillonnées n'ont pas connu de stress hydrique, ce qui peut être expliqué par une disponibilité en eau adéquate à la croissance sur l'ensemble des sites et la résistance de l'épinette à des variations de niveau d'eau qui n'induisent pas de stress hydrique (immersion permanente des tiges, sécheresse prolongée). La présence et l'abondance de l'épinette noire sur la rive des cours d'eau de la forêt boréale qui

subissent des crues épisodiques et la similarité observée entre les courbes de croissance des arbres d'intérieur, ceux sur la rive et les arbres riverains des différents sites principaux indique que l'épinette noire est bien adaptée aux variations épisodiques des conditions hydriques du sol (Denneker *et al.*, 1999). Ceci serait en partie expliqué par le fait que le système racinaire de l'épinette noire est situé en grande partie dans les premières dizaines de centimètres de la surface du sol et qu'il a une propension à réagir promptement à des stress écologiques par la formation de racines adventives (Krause et Morin, 2005; Krause, 2010).

6.2 Tiges d'épinettes noires riveraines et tiges subfossiles

L'absence de réponse en croissance des épinettes noires riveraines aux variations de niveau d'eau des lacs est aussi observée à deux hauteurs dans la tige (50 cm du sol et 4 m du sol). La régularité dans la croissance entre les échantillons à 50 cm et 4 m du sol dans l'accroissement de la tige à différentes hauteurs a déjà été observée chez les conifères (Clyde et Titus, 1987; LeBlanc, 1990; Chinn *et al.*, 2010). Ainsi, les résultats obtenus pour les coupes à 4 m suggèrent que les épinettes noires subfossiles utilisées dans les reconstitutions hydroclimatiques n'ont pas enregistré les variations de niveau d'eau des lacs lorsqu'elles étaient vivantes sur la rive. Ainsi, le signal climatique utilisé dans les patrons de croissance des tiges riveraines et subfossiles n'est pas biaisé par un signal de variations de niveau d'eau des lacs.

Tel que mentionné dans la Méthode, les tiges subfossiles de lac d'épinette noire échantillonnées pour les reconstitutions hydroclimatiques faites dans la région d'étude proviennent de la portion supérieure d'anciennes tiges riveraines et correspondent à une hauteur moyenne d'échantillonnage de 4 m du sol (Autin, communication personnelle). Ainsi, la croissance des échantillons recueillis à 4 m du sol dans la présente étude s'associe à celle des échantillons qui pourraient être utilisés dans le cadre des reconstitutions hydroclimatiques millénaires. De cette façon, il n'y a pas de biais relié aux variations de niveau d'eau qui doit être considéré lors de leur utilisation dans les reconstitutions hydroclimatiques.

6.3 Croissance en milieu immergé persistant

La réponse en croissance observée pour les coupes à 50 cm du sol des tiges d'épinette noire immergées pourrait s'expliquer par l'augmentation de la disponibilité en eau sur l'ensemble du site causée par l'inondation en 1974. Labarre (2011) a observé que l'épinette noire répondait de façon positive en croissance à des précipitations estivales au-dessus de la normale en juillet, au moment où elle réalise la plus grande partie de sa croissance annuelle. Les résultats obtenus laissent supposer que les tiges d'épinettes noires du site immergé auraient répondu positivement en croissance à l'augmentation du niveau d'eau lors de leur croissance en juillet 1975, alors que leur sensibilité à la disponibilité hydrique est à son maximum (Labarre, 2011).

La hausse en croissance pour les coupes à 50 cm du sol est absente des coupes à 4 m du sol pour les mêmes tiges, suggérant un effet d'inondation du site sur la croissance dans le bas des tiges. Cette différence dans la croissance à différentes hauteurs d'échantillonnage selon les conditions climatiques a déjà été observée, mais l'effet de l'immersion et de la saturation en eau du sol demeure inconnu. Selon Chhin *et al.* (2010), lorsque la fin de la saison de croissance précédente est humide et frais et que le début de la saison de croissance actuelle est chaud et sec, la croissance du pin tordu (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud. var. *latifolia* Engelm.) répond positivement dans le bas de la tige. Ils ont observé que de telles conditions limitent la croissance dans le haut de la tige. Alors que l'inondation du site en 1974 n'a probablement pas contribué à un début de la saison de croissance de 1975 chaud et sec, il est possible qu'elle ait contribué à la formation de réserves en glucides à la fin de la saison de croissance de 1974 (Chhin *et al.*, 2010). Ces réserves en glucides contribuent à la croissance dans le bas de la tige l'année suivante (Fritts, 1976). Ce phénomène combiné à celui d'une meilleure disponibilité hydrique au mois de juillet aurait pu contribuer de façon temporaire à la croissance des épinettes noires à 50 cm du sol en 1975.

Néanmoins, il est impossible de savoir si une telle réponse pour les arbres d'intérieur à 50 cm du sol est due à leur immersion temporaire ou simplement à une amélioration des conditions hydriques du sol. La pente faible (pente de 0 à 5 degrés) et une différence de moins de 1 mètre de hauteur entre la base des tiges échantillonnées du milieu immergé et de celles en forêt suggère un approvisionnement en eau similaire sur l'ensemble du site. Il est fort possible que le système racinaire des tiges échantillonnées en forêt se soit retrouvé dans un sol saturé en eau et que cela ait contribué temporairement à leur croissance (Puhe, 2003; Krause et Morin, 2005). Une étude approfondie sur l'immersion des tiges et l'amélioration de la disponibilité eau dans le sol sur des sites avec des degrés différents de saturation en eau permettrait de mieux comprendre ce phénomène sur la croissance à différentes hauteurs d'échantillonnage.

Finalement, il est impossible de rapporter les résultats obtenus sur le site immergé aux à ceux obtenus sur les sites principaux, puisque le site immergé est un ancien ruisseau avec une faible pente, alors que le milieu d'échantillonnage des sites principaux est caractérisé par une transition abrupte entre la forêt et la rive. De même, l'absence d'une hausse en croissance à 4 m du sol pour l'année 1975 suggère que les tiges d'épinettes noires subfossiles échantillonnées n'ont pas répondu à une abrupte augmentation de la disponibilité en eau dans le sol.

6.4 Réponse anatomique de l'épinette noire à l'immersion prolongée

Le nombre limité d'échantillons utilisé dans l'analyse anatomique et l'utilisation d'une seule file radiale pour les mesures sur chaque cerne doivent être pris en considération dans la discussion des résultats. Ces résultats agissent à titre d'indication pour de possibles études futures sur le sujet.

Tout d'abord, la diminution du nombre de trachéides produites par cerne pour les rayons d'arbres morts immergés pourrait être expliquée par le raccourcissement de la saison de croissance causé par les conditions contraignantes de la saturation en eau du sol. Ce phénomène

de la baisse du nombre de trachéides par cerne a déjà été observé pour des épinettes noires ayant connu une saison de croissance plus froide (Wang *et al.*, 2002; Huang *et al.*, 2011).

D'autre part, les résultats obtenus pour la proportion de bois final pour les arbres morts immergés après 1974 laissent présager que leur immersion a raccourci la période de production des trachéides de bois initial, tout en provoquant la production hâtive des trachéides de bois final et la maturation des trachéides. Le bois final, selon la formule de Mork (Denne, 1989), débute dans le cerne à la première trachéide dont l'épaisseur de la double paroi cellulaire est égale au double du diamètre du lumen. Dans des conditions non contraignantes, la formation de bois final débute lorsque l'épinette noire a terminé la production de nouvelles feuilles et la photopériode diminue, ce qui équivaut approximativement au début juillet. Toutefois, lorsque les tiges sont immergées, le sol est en déficit d'oxygène et se réchauffe plus lentement au début de la saison de croissance, écourtant la période consacrée à la production et l'élongation des trachéides de bois initial (Huang *et al.*, 2011). Ce raccourcissement entraîne une production hâtive de bois final, suivie du processus de lignification et d'épaississement de la paroi cellulaire des trachéides (Bégin, 2000; Deslauriers *et al.*, 2010).

Toutefois, le nombre de trachéides produites par cerne pour les arbres d'intérieur n'indique pas une baisse semblable à celle des arbres morts immergés après 1974. Ce résultat et la hausse de la proportion du nombre de trachéides de bois final laissent présager une période de production des trachéides plus longue que celle des arbres immergés, mais avec une proportion semblable en bois final. Il est possible que le drainage à l'échelle du site entraîne la saturation en eau du sol et crée des conditions temporaires pendant la saison de croissance semblables à celles causées par l'immersion (anoxie, basse température du sol). Selon les résultats obtenus, ces conditions déclencheraient la production prématurée des trachéides de bois final, mais sans contraindre le nombre total de trachéides produites par cerne.

Les mesures du nombre de trachéides par cerne et de la proportion du bois final à l'échelle anatomique semblent adéquates pour l'évaluation des effets de l'immersion sur l'épinette

noire. Il serait intéressant de savoir si l'épinette noire répond de façon similaire en croissance et de façon anatomique à une immersion et à une augmentation abrupte du contenu du sol en eau. Toutefois, la similarité des résultats obtenus pour la proportion de bois final avec les arbres d'intérieur et les arbres morts immergés permet de conseiller l'importance d'un échantillonnage judicieux tenant compte du type de sol et du drainage à l'échelle du site. De plus, la mesure de chaque cellule sur plusieurs files radiales pour chacun des cernes offrirait une plus grande précision et représentativité de la croissance à l'intérieur des cernes (Cournoyer, 2010). D'autres paramètres anatomiques pourraient aussi être utilisés pour évaluer l'effet de l'immersion, tels le diamètre du lumen et la largeur de la double paroi cellulaire (Idem, 2010).

7 CONCLUSION

Les analyses de croissance des épinettes noires riveraines de lacs boréaux dont le niveau d'eau a été modifié ne révèlent pas de signal de variation de niveau d'eau pouvant biaiser les reconstitutions hydroclimatiques. La croissance similaire entre les épinettes noires riveraines et celles situées en retrait en forêt (analyse intrasite), ainsi qu'entre les épinettes noires riveraines de lacs ayant subi un abaissement et un relèvement du niveau d'eau (analyse intersite), ne démontre aucun changement dans la croissance attribuable aux variations de niveau d'eau créées après 1977 sur les lacs échantillonnés. La tolérance de l'épinette noire à une grande amplitude de conditions hydriques dans le Nord du Québec, ainsi que la distribution de la plus grande partie de son système racinaire dans les premières dizaines de centimètres des sols bien drainés des sites échantillonnés expliqueraient les résultats obtenus.

Étant donné que la section utilisée des tiges subfossiles échantillonnées pour les reconstitutions hydroclimatiques correspond à une hauteur moyenne de 4 m du sol, une analyse de croissance a été faite entre des coupes transversales à 50 cm et à 4 m du sol. Les résultats obtenus pour cette analyse indiquent une croissance correspondante aux deux hauteurs d'échantillonnage. Ainsi, ces résultats et ceux obtenus pour les analyses de croissance intrasite et intersite confirment l'absence d'un signal de variation de niveau d'eau chez les épinettes noires riveraines susceptibles de devenir subfossiles. La présente étude permet de conclure qu'aucun signal de "variation de niveau d'eau" ne doit être considéré dans le cadre des reconstitutions hydroclimatiques dans le Nord du Québec avec les tiges d'épinettes noires.

L'étude complémentaire sur la mort des tiges d'épinettes noires causée par l'immersion prolongée démontre que les tiges non immergées (en forêt) et les tiges mortes immergées ont répondu de façon différente en croissance à deux hauteurs d'échantillonnage (50 cm et 4 m du sol) l'année suivant l'immersion du site. Le bas des tiges aurait répondu positivement et de façon temporaire à la hausse du niveau d'eau sur l'ensemble du site. L'objectif exploratoire de l'utilisation de l'imagerie numérique dans l'étude des caractéristiques anatomiques des tiges mortes immergées a démontré que les proportions de bois final ont augmenté pour l'ensemble

des rayons, confirmant un effet de l'augmentation du niveau d'eau pour l'ensemble des tiges du site. Une étude exhaustive sur l'effet de l'immersion et le contenu en eau du sol sur la croissance et les caractéristiques anatomiques à différentes hauteurs permettrait de mieux comprendre les résultats obtenus avec les échantillons du site immergé.

8 RÉFÉRENCES

Allard, M., Séguin, M. K., 1985. La déglaciation d'une partie du versant hudsonien québécoise: bassins des rivières Nastapoca, Sheldrake et à l'Eau Claire. *Géographie physique et Quaternaire* 39 : 13-24.

Arseneault, D., 2010. Longues séries dendrochronologiques dans le nord-est de l'Amérique du Nord. Pages 731-747 dans S. Payette et L. Filion (dir). *La dendroécologie : Principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec.

Arseneault, D., Dy, B., Gennaretti, F., Autin, J., Bégin, Y., 2013. Developing millennial tree ring chronologies in the fire-prone North American boreal forest. *Journal of Quaternary Science* 28: 283-292.

Asselin, H., Payette, S., 2006. Origin and long-term dynamics of a subarctic tree line. *Ecoscience* 13: 135-142.

Bégin, Y., Payette S., 1988. Dendroecological evidence of lake level changes during the last three centuries in subarctic Québec. *Quaternary Research* 30 : 210-220.

Bégin, Y., Bérubé, D., Grégoire, M., 1993. Downward migration of coastal conifers as a response to recent land emergence in eastern Hudson Bay, Québec. *Quaternary Research* 40: 81-88.

Bégin, Y., 2000. Reconstruction of subarctic lake levels over past centuries using tree rings. *Journal of Cold Regions Engineering* 4 : 192-212.

Bégin, Y., 2001. Tree-ring dating of extreme lake levels at the subarctic-boreal interface. *Quaternary Research* 55 : 133-139.

Bégin, Y., Sirois, L., Meunier, C., 2010. The effects of hydroelectric flooding on a reservoir's peripheral forests and newly created forested islands. Pages 241-255 dans M. Stoffel et al. (eds). *Advances in Global Change Research* 41.

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

Bergeron, Y., Gauthier, S., Flannigan, M., Kafka, V., 2004. Fire regimes at the transition between mixedwood and coniferous boreal forest in northwestern quebec. *Ecology* 85 : 1916-1932.

Boucher, É., Bégin, Y., Arseneault, D., 2010. Dendrohydrologie en milieu boréal. Pages 573-592 dans S. Payette et L. Filion (dir). *La dendroécologie: Principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec.

Boulanger, Y., Arseneault, D., Morin, H., Jardon, Y., Bertrand, P., 2012. Dendrochronological reconstruction of spruce budworm (*Archips fumiferana* Clem.) outbreaks in southern Québec for the last 400 years. *Canadian Journal of Forest Research* 42 : 1264-1276.

Campelo, F., García-González, I., Nabais, C., 2012. detrendeR – A graphical user interface to process and visualize tree-ring data using R. *Dendrochronologia* 30: 57-60

Chhin, S., Ted Hogg, E.H., Lieffers, V.J., Huang, S., 2010. Growth-climate relationships vary with height along the stem in lodgepole pine. *Tree Physiology* 30: 335-345.

Clyde, M.A., Titus, S.J., 1987. Radial and longitudinal variation in stem diameter increment of lodgepole pine, white spruce, and black spruce: species and crown class differences. *Canadian Journal of Forest Research* 17: 1223-1226.

Commission for Environmental Cooperation, 1997. Ecological regions of North America, toward a common perspective. CEC, Montréal, 71 p.

Cook, E.R., 1985. A time series analysis approach to tree-ring standardization. Thèse de doctorat, Université de l'Arizona, Tucson.

Copenheaver, C. A., Hendrick, L. E., Houchins, J. W., Pearce, C. D., 2010. Changes in growth and dendroclimatic response of trees growing along an artificial lake. *The American Midland Naturalist* 163 : 134-145.

Cournoyer, L., 2010. Imagerie numérique et analyse densiométrique. Pages 283-310 dans *La dendroécologie: Principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec.

D'Arrigo, R., Wilson, R., Jacoby, G., 2006. On the long-term context for late twentieth century warming. *Journal of Geophysical Research* 111 : 12 p.

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

Delwaide, A., Filion, L., 2010. Échantillonnage et datation dendrochronologiques. Pages 167-197 dans S. Payette et L. Filion (dir). La dendroécologie: Principes, méthodes et applications. Presses de l'Université Laval, Québec.

De Micco, V., Saurer, M., Aronne, G., Tognetti, R., Cherubini, P., 2007. Variations of wood anatomy and $\delta^{13}\text{C}$ within-tree rings of coastal *Pinus Pinaster* showing intra-annual density fluctuations. IAWA Journal 28 : 61-74.

Denne, M.P., 1988. Definition of latewood according to Mork (1928). IAWA Bulletin 10: 59-62.

Denneler, B., Bergeron, Y., Bégin, Y., 1999. An attempt to explain the distribution of the tree species composing the riparian forests of Lake Duparquet, southern boreal region of Quebec. Canadian Journal of Botany 77 : 1744-1755.

Denneler, B., Bergeron, Y., Bégin, Y., Asselin, H., 2008. Growth responses of riparian *Thuja occidentalis* to the damming of a large boreal lake. Botany 86 : 53-62.

Deslauriers, A., Rossi, S., Morin, H., Cornelia, K., 2010. Analyse du développement intrannuel des cernes de croissance. Pages 61-92 dans S. Payette et L. Filion (éds). La dendroécologie : Principes, méthodes et applications. Presses de l'Université Laval, Québec.

Dufour, B., Morin, H., 2010. Tracheid production phenology of *Picea mariana* and its relationship with climatic fluctuations and bud development using multivariate analysis. Tree Physiology 30: 853-865.

Environnement Canada, 2013. Archives climatique nationales du Canada. <http://climat.meteo.gc.ca>, Consulté en janvier 2013.

Environnement Canada, 2011. Eau – Base de données HYDAT. <http://www.ec.gc.ca/rhc-wsc/default.asp?lang=Fr&n=9018B5EC-1>, Consulté en janvier 2013.

Esper, J., Frank, D.C., Timonen, M., Zorita, E., Wilson, R.J.S., Luterbacher, J., Holzkämper, S., Fischer, N., Wagner, S., Nievergelt, D., Verstege, A., Büntgen, U., 2012. Orbital forcing of tree-ring data. *Nature Climate Change* 2: 862-865.

Filion, L., Payette, S., Gauthier, L., Boutin, Y., 1986. Light rings in subarctic conifers as dendrochronological tool. *Quaternary Research* 26 :272-279.

Fritts, H. C., 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press. 505 pages.

Grissino-Mayer, H. D., 2001. Evaluating crossdating accuracy : a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57 : 205-221.

Grossnickle, 2000. *Ecophysiology of northern spruce species: the performance of planted seedlings*. NRC Research Press, Ottawa. 407 p.

Guiot, J., Gally, Y., 2013. R Package: bioindic. <https://www.eccorev.fr/spip.php?article389>, Consulté en septembre 2012.

Hare, F.K., Ritchie, J.C., 1972. The boreal bioclimates. *Geographical Review* 62 : 333-365.

Gärtner, H., Heinrich, I., 2010. Anatomie des cernes annuels chez les plantes ligneuses en régions tempérées tropicales. Pages 33-60 dans S. Payette et L. Filion (éds). *La dendroécologie : Principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec.

Héon, J., 2010. Chevauchement des feux dans la taiga du Québec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec.

Hillaire-Marcel, C., Grant, D. R., Vincent, J.-S., Comment and reply on «Keewatin ice sheet - reevaluation of the traditional concept of the Laurentide ice sheet" and "Glacial erosion and ice sheet divides, northeastern Laurentide ice sheet, on the basis of the distribution of limestone erratics». *Geology* 8 : 466-468.

Huang, M., Lee Barbour, S., Elshorbagy, A., Zettl, J. D., Cheng Si, B., 2011. Water availability and forest growth in coarse-textures soils. *Canadian Journal of Soil Science* 91: 199-210.

Hupp, C.R., 1988. Plant ecological aspects of flood geomorphology and paleoflood history. *Flood Geomorphology*. p. 335-356.

Holmes, R.L., 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.

Jagels, R., Telewski, F.W., 1990. Computer-aided image analysis of tree rings. Pages 76-96 dans E. Cook et L. Kairiukstis (eds). *Method of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publications, Dordrecht.

Jansen, E., Overpeck, J., Briffa, K.R., Duplessy, J.-C., Joos, F., Masson-Delmotte, V., Olago, D., Otto-Bliesner, B., Peltier, W.R., Rahmstorf, S., Ramesh, R., Raynaud, D., Rind, D., Solomina, O., Villalba, R., Zhang, D., 2007. Palaeoclimate dans S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA.

Jones, P.D., Briffa, K.R., Osborn, T.J., Lough, J.M., Van Ommen, T.D., Vinther, B.M., Luterbacher, J., Wahl, E.R., Zwiers, F.W., Mann, M.E., Schmidt, G.A., Ammann, C.M., Buckley, B.M., Cobb, K.M., Esper, J., Goosse, H., Graham, N., Jansen, E., Kiefer, T., Kull, C., Küttel, M., Mosley-Thompson, E., Overpeck, J.T., Riedwyl, N., Schulz, M., Tudhope, A.W., Villalba, R., Wanner, H., Wolff E., Xoplaki, E., 2009. High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: a review of current status and future prospects. *The Holocene* 19: 3-49.

Krause, C., Morin, H., 2005. Adventive-root development in mature black spruce and balsam fir in the boreal forests of Quebec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 2642-2654.

Krause, C., 2010. Développement du système racinaire des arbres. Pages 93-106 dans S. Payette et L. Filion (dir). *La dendroécologie: Principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec.

Labarre, T., 2011. Variables géo-écologiques influençant l'enregistrement d'un signal climatique dans les cernes de croissance de l'épinette noire (*Picea mariana* Mill. BSP.) dans la partie nord de la forêt boréale, Québec. Mémoire de maîtrise, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec.

Lamhamedi, M.S., Bernier, P.Y., 1994. Ecophysiology and field performance of black spruce (*Picea mariana*) : a review. *Annals of Forest Science* 51 : 529-551.

LeBlanc, D.C., 1990. Relationships between breast-height and whole-stem growth indices for red spruce on Whiteface Mountain, New York. *Canadian Journal of Forest Research* 20 : 1399-1406.

Lebourgeois, F., Mérian, P., 2012. Principes et méthodes de la dendrochronologie. LERFOB, INRA-ENGREF 1092, AgroParisTech-ENGREF, 80 pages.

Loaiciga, H., Haston, L., Michaelsen, J., 1993. Dendrohydrology and long-term hydrologic phenomena. *Review of geophysics* 31 : 151-171.

Loaiciga, H., 2005. Drought, tree rings, and reservoir design. *Journal of the American Water Resources Association* August 2005 : 949-958.

Ministère des Ressources Naturelles, 2012. Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec, <http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-zones.jsp>, Consulté en décembre 2012.

Nicault, A., Bégin, Y., Guiot, J., 2010. Standardisation des séries dendrochronologique. Pages 198-227 dans S. Payette et L. Filion (dir). *La dendroécologie: Principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec.

Osterkamp, W.R., Hupp, C.R., 1996. Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes. *Geomorphology* 14 : 277-295.

Osterkamp, W.R., Hupp, C.R., 2010. Fluvial processes and vegetation - Glimpses of the past, the present, and perhaps the future. *Geomorphology* 116 : 274-285.

Parisien, M.-A., Sirois, L., 2003. Distribution and dynamics of tree species across a fire frequency gradient in the James Bay Region of Québec. *Canadian Journal of Forest Research* 33 : 243-256.

Payette, S., Morneau, C., Sirois, L., Despons, M., 1989. Recent fire history of the Northern Québec Biomes. *Ecology* 70 : 656-673.

Payette, S., Delwaide, A., 1991. Variations séculaires du niveau d'eau dans le bassin de la rivière Boniface (Québec nordique): une analyse dendroécologique. *Géographie physique et Quaternaire* 45 : 59-67.

Payette, S., Delwaide, A., 1994. Growth of black spruce at its northern range limit in arctic Québec, Canada. *Arctic and Alpine Research* 26 : 174-179.

Payette, S., 1992. Fire as a controlling process in the North American boreal forest. in Shugart, H.H., Leemans, R.R. & Bonan, G.B. (éd). *A systems analysis of Global Boreal Forest*. Cambridge University Press, Cambridge : 145–169.

Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences* 11 : 1633-1644.

Pereg, D., Payette, S., 1998. Development of black spruce growth forms at treeline. *Plant Ecology* 138 : 137-147.

Prévost, M., Dumais, D., Plamondon, A.P., 2005. Effets du drainage sur la croissance et le statut nutritif d'un peuplement d'épinette noire de structure inéquienne : résultats de 10 ans. *The Forestry Chronicle* 81 : 516-524.

Projet ARCHIVES, 2013. Description, <http://archives.ete.inrs.ca/fr/node/2>, Consulté en avril 2013.

R Core Team, 2012. R: A language and environment for statistical computing, <http://www.R-project.org>, R Foundation for Statistical Computing. Vienna.

Richard, P.J.H., Larouche, A., 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.

RINNTECH, 2006. LignoVision 1.37. Heidelberg.

Rossi, S., Deslauriers, A., Anfodillo, T., Morin, H., Saracino, A., Motta, R., Borghetti, M., 2006. Conifers in cold environments synchronize maximum growth rate of tree-ring formation with day length. *New Phytologist* 170: 301-310.

Schweingruber, F.H., 1990. Radiodensitometry. Pages 55-63 dans E. Cook et L. Kairiukstis (eds). *Method of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publications, Dordrecht.

Schweingruber, F.H., 2007. *Wood Structure and Environment*. Springer, New York, 256 pp.

SCIEM, 2007. OSM 3 : On Screen Measuring and Image Analysis. Vienne.

SCIEM, 2007. PAST4: Personal Analysis System for Treering Research. Vienne.

Société d'énergie de la Baie James, 1987. Le complexe hydroélectrique de la Grande Rivière – Réalisation de la première phase. SEBJ, Montréal, 465 pp.

St. George, S., Nielsen, E., 2003. Paleoflood records for the Red River, Manitoba, Canada, derived from anatomical tree-ring signatures. *The Holocene* 13 : 547-555.

St-Germain, J.-L., Krause, C., 2008. Latitudinal variation in tree-ring and wood cell characteristics of *Picea mariana* across the continuous boreal forest in Quebec. Canadian Journal of Forest Research 38: 1397-1405.

Stockton, C. W., Fritts, H. C., 1973. Long-term reconstruction of water level changes for Lake Athabasca by Analysis of Tree Rings. Water Resources Bulletin 9 : 1006-1025.

Stocks, B. J., Mason, J. A., Todd, J. B., Bosch, E. M., Wotton, B. M., Amiro B. D. , Flannigan, M. D., Hirsch, K. G., Logan, K. A., Martell, D. L., Skinner W.R., 2003. Large Forest Fires in Canada, 1959-1997. Journal of Geophysical Research 108 : 5-1 – 5-12

Tardif, J., Bergeron, Y., 1993. Radial growth of *Fraxinus nigra* in a canadian boreal floodplain in response to climatic and hydrological fluctuations. Journal of Vegetation Science 4 : 751-758.

Thibeault-Martel, M., Krause, C., Morin, H., Rossi, S., 2008. Cambial activity and intra-annual xylem formation in roots and stems of *Abies balsamea* and *Picea mariana*. Annals of Botany 102: 667-674.

Trenhaile, A. S., 2004. Geomorphology, A Canadian Perspective. Oxford, 399 p.

Vaganov, 1990. The tracheidogram method in tree-ring analysis and its application. Pages 63-76 in E. Cook et L. Kairiukstis (eds). Method of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Kluwer Academic Publications, Dordrecht.

Vallée, S., Payette, S., 2004. Contrasted growth of black spruce (*Picea mariana*) forest trees at treeline associated with climate change over the Last 400 Years. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 36 : 400-406.

Veillette, J. J., 1997. Le rôle d'un courant tardif dans la déglaciation de la baie James. *Géographie physique et Quaternaire* 51 : 141-161.

Wang, L., Payette, S., Bégin, Y., 2002. Relationships between anatomical and densitometric characteristics of black spruce and summer temperature at tree line in northern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* 32 : 477-486.

9 ANNEXE

9.1 Statistiques descriptives – Sites principaux

Tableau 9.1 Statistiques descriptives des chronologies construites à partir des coupes échantillonnées (été 2011). Pour la colonne Sites, A signifie un lac dont le niveau d'eau a été abaissé, T un lac dont le niveau est demeuré inchangé et E un lac dont le niveau a été élevé. Pour la colonne Série, F indique les arbres d'intérieur, R les arbres sur la rive. H50 = coupe à 50 cm du sol et H400 = coupe à 400 cm du sol.

Sites	Séries	N	Période	Âge moyen	Largeur moy. (mm)	É-T (mm)	Sensi.	Ar1	EPS
A-M01	F H50	10	1735-2010	172	0.36	0.17	0.16	0.87	0.81
	R H50	10	1792-2010	169	0.41	0.21	0.17	0.90	0.76
	F H400	10	1856-2010	107	0.40	0.18	0.14	0.86	0.81
	R H400	10	1818-2010	125	0.35	0.21	0.15	0.88	0.84
A-M02	F H50	10	1792-2010	151	0.49	0.22	0.17	0.85	0.77
	R H50	10	1807-2010	165	0.38	0.17	0.17	0.85	0.77
	F H400	10	1875-2010	96	0.52	0.25	0.15	0.84	0.75
	R H400	10	1873-2010	105	0.36	0.21	0.15	0.89	0.83
T-L12	F H50	10	1753-2010	165	0.49	0.19	0.16	0.84	0.86
	R H50	10	1783-2010	173	0.47	0.22	0.16	0.89	0.80
	F H400	10	1806-2010	112	0.54	0.19	0.14	0.81	0.75
	R H400	10	1868-2010	121	0.45	0.22	0.13	0.89	0.72
T-L18	F H50	10	1770-2010	182	0.44	0.20	0.16	0.86	0.69
	R H50	10	1674-2010	213	0.41	0.17	0.16	0.85	0.72
	F H400	10	1805-2010	171	0.47	0.20	0.13	0.86	0.72
	R H400	10	1780-2010	169	0.39	0.18	0.13	0.91	0.79
E-L16	F H50	10	1803-2010	152	0.49	0.22	0.16	0.85	0.81
	R H50	10	1775-2010	173	0.44	0.18	0.16	0.84	0.78
	F H400	10	1828-2010	104	0.56	0.22	0.13	0.87	0.84
	R H400	10	1866-2010	112	0.41	0.21	0.14	0.89	0.77
E-L25	F H50	10	1800-2011	154	0.52	0.28	0.16	0.84	0.75
	R H50	10	1793-2010	151	0.53	0.21	0.17	0.83	0.80
	F H400	10	1811-2010	115	0.49	0.26	0.13	0.89	0.76
	R H400	10	1852-2010	113	0.46	0.24	0.14	0.89	0.75

É-T = écart-type
Sensibilité = sensibilité moyenne

Ar1 = Auto-corrélation de premier ordre
EPS = *Expressed population signal*

1650 1675 1700 1725 1750 1775 1800 1825 1850 1875 1900 1925 1950 1975 2000



Figure 9.1 Durée de vie des tiges échantillonnées à la rive et d'intérieur (coupes à 50 cm du sol). Les sites avec le préfixe A ont un niveau d'eau abaissé (rouge), ceux avec le préfixe T le niveau d'eau est demeuré inchangé (vert) et ceux avec le préfixe E le niveau d'eau a été haussé élevé (bleu).

9.2 Statistiques descriptives – Site immergé

Tableau 9.2 Statistiques descriptives des chronologies construites à partir des coupes échantillonnées à l'automne 2012.

Sites	Séries	Poids	Chrono.	Âge moyen	Moy. Largeur (mm)	É-T (mm)	Sensi.	Ar1	EPS
E-K20	F H50	16	1795-2012	102	0.57	0.30	0.17	0.85	0.89
	R H50	16	1753-1997	136	0.44	0.19	0.17	0.84	0.83
	F H400	16	1893-2012	67	0.49	0.32	0.14	0.85	0.78
	R H400	16	1861-2003	75	0.47	0.29	0.17	0.89	0.91

É-T = écart-type

Sensibilité = sensibilité moyenne

Ar1 = Auto-corrélation de premier ordre

EPS = *Expressed population signal*

