

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

**DENDROÉCOLOGIE DU PIN GRIS (*PINUS BANKSIANA*  
LAMB) DANS LE HAUT-BOREAL DU QUEBEC**

Par  
Nanie Ayotte

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

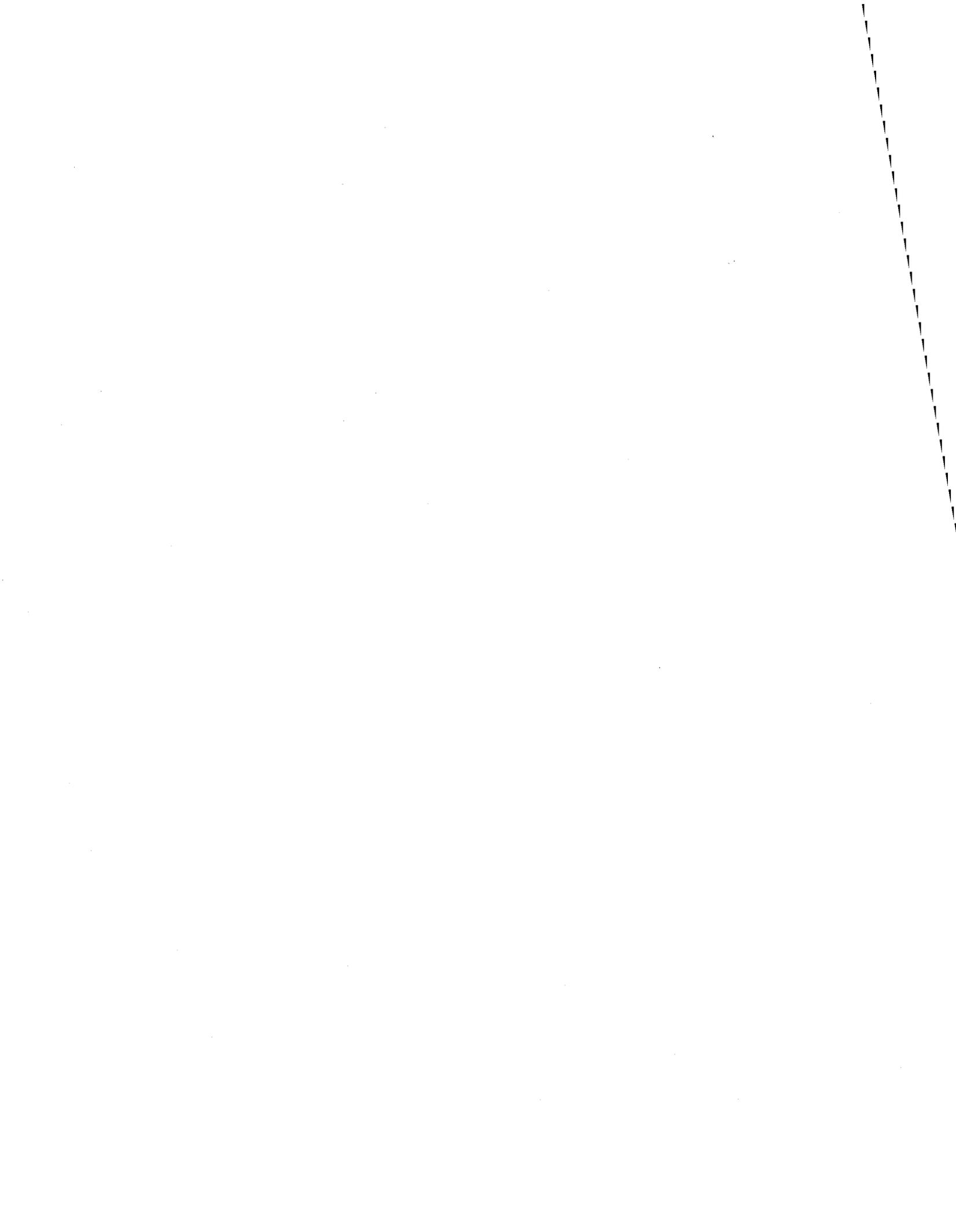
Normand Bergeron  
INRS-ETE

Examineur externe

Diane Saint-Laurent  
Département de géographie  
UQTR

Directeur de recherche

Yves Bégin  
INRS-ETE



## REMERCIEMENTS

Ce mémoire de maîtrise ne serait pas sous vos yeux aujourd'hui sans le soutien indéfectible d'un grand nombre de personnes envers lesquelles je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements.

Un grand merci à mon directeur de recherche, Yves Bégin, pour la confiance qu'il m'a accordée, du jour de notre premier entretien jusqu'à la fin de ce projet, pour ses encouragements, sa générosité et l'expérience du Grand Nord québécois.

Un merci tout spécial vers l'outre-mer pour Antoine Nicault, pour ses conseils, sa passion, son implication et sa disponibilité; ce fut un réel plaisir d'échanger et de partager ces moments.

Un autre merci est dirigé vers Joëlle Marion, pour sa patience, son précieux temps, sa disponibilité, ses indispensables conseils et son sourire.

Un énorme merci à mes parents, ma sœur et mes amis, d'avoir été aussi patients avec moi, de m'avoir écoutée, soutenue, d'avoir toujours cru en moi... parfois plus que moi-même.

Merci aussi à Suzanne Dussault pour sa patience à me guider dans les dédales administratifs parfois dignes du formulaire A-38.

Merci à tous les membres de l'équipe ARCHIVES.

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.



## RESUMÉ

Cette étude a été menée avec l'objectif de déterminer dans quelle mesure le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb) enregistre le climat différemment de l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] BSP) et quels sont les facteurs qui ont une influence sur sa croissance. L'épinette noire est une espèce couramment utilisée en dendrochronologie et l'étude vise à établir un comparatif entre les deux espèces afin de déceler le potentiel du pin gris à des fins de reconstitution climatique. Les travaux ont été menés en Jamésie et ont été effectués sur un ensemble de crêtes rocheuses à l'intérieur duquel coexistent milieux mésiques et xériques. La confrontation des deux milieux est un exercice visant à vérifier si le pin gris est plus sensible aux précipitations que l'épinette noire. Des dendroséries ont été produites pour l'épinette noire et le pin gris en milieu mésique et en milieu xérique. Dans un premier temps, les patrons de croissance (bruts et standardisés) des deux espèces ont été confrontés entre eux et entre les milieux avec l'objectif de déterminer en quoi ils diffèrent. Dans un second temps, les patrons de croissance (bruts et standardisés) des pins gris provenant des deux milieux distincts ont été comparés afin d'en relever les différences. Enfin, les largeurs de cernes ont été confrontées à différents paramètres climatiques par le calcul de fonctions de réponse afin d'étudier les meilleures corrélations. Les résultats montrent que les deux espèces ont une croissance très différente alors que les deux populations équiennes (issues du même feu) croissent dans les mêmes conditions. Le pin gris a une croissance plus variable et présente des anomalies de croissance qui ne sont pas présentes chez l'épinette. Il apparaît qu'en dépit d'un rythme de croissance différent, le pin gris ne soit pas plus sensible au climat par le biais de cette technique. Mis-à-part une réponse au couvert neigeux du pin gris, il semble que les deux espèces répondent de façon très similaire au climat. Sur la base des fonctions de réponse et des anomalies de croissance présentes chez les individus de pin gris échantillonnés, il est raisonnable de conclure que le pin gris situé en crête rocheuse n'est pas une espèce à considérer lors de reconstitutions climatiques avec les connaissances actuelles.

Mots-clés : Pin gris, épinette noire, dendrochronologie, climat, fonctions de réponse, patrons de croissance, anomalies de croissance.



## ABSTRACT

This study aims at determining to which degree Jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) tree-ring records resemble black spruce (*Picea mariana* Mill. BSP) one to the same climatic variables in similar contrasted habitats. Black spruce is currently used as a sensitive species in dendrochronology and this study aimed to examine the potentials of Jack pine for tree-ring reconstructions in similar conditions. The study was carried out in the James Bay area on a series of rocky outcrops where both Jack pines and black spruces grow in conditions qualified as xeric and mesic in terms of drainage. The comparison of the two conditions is to determine the most sensitive to humidity, between the two species. We then provided the two groups of species and the two drainage conditions with sets of average tree-ring series. Raw ring-width and standardized time series were firstly compared among this sampling design. Secondly, a similar analysis was done among the same species, comparing growth in xeric and mesic conditions. Thirdly, ring-width series were used with response functions in order to determine the most relevant climatic variables that influence their growth. As a result, the two species forming fire-prone even-aged stands differ largely in growth rate while living in similar conditions. Jack pine has a higher sensitivity of growth than spruce and presents several growth-ring anomalies. Even if pine growth differs from that of spruce, it is not even more sensitive to climate according to response functions technique, except for snow depth that seems to be the only variable that produces differences. As a conclusion, although we postulated that the xeric conditions of rocky outcrops would have limited Jack pine growth, to our present knowledge, it does not appear as a suitable species to reconstruct any dry episodes and be considered as a valuable species for dendrochronological study purposes.

Keywords: Jack Pine, Black Spruce, dendrochronology, climate, response functions, growth pattern, growth abnormalities.



# TABLE DES MATIÈRES

|  |    |
|--|----|
| REMERCIEMENTS .....  | ii |
| RESUMÉ.....  | iv |
| 1 . INTRODUCTION.....  | 1  |
| 2 . ZONE D'ÉTUDE.....  | 7  |
| 2.1 Le milieu.....   | 7  |
| 2.2 Histoire glaciaire de la région.....   | 8  |
| 2.3 Établissement du pin gris et de l'épinette noire.....  | 9  |
| 2.4 Écologie du pin gris.....  | 10 |
| 2.4.1 Aire de répartition du pin gris .....  | 10 |
| 2.4.2 Caractéristiques physiologiques .....  | 11 |
| 2.4.3 Perturbations.....   | 13 |
| 3 . MATÉRIEL ET MÉTHODES .....   | 17 |
| 3.1 Sites d'étude et échantillonnage .....   | 17 |
| 3.1.1 Groupe « étude » .....   | 19 |
| 3.1.2 Groupe « témoin » .....  | 22 |
| 3.2 Traitement des échantillons.....   | 24 |
| 3.2.1 Groupe « étude » .....   | 24 |
| 3.2.2 Groupe « témoin » .....  | 25 |
| 3.3 Traitement des données .....   | 26 |
| 3.3.1 Croissance cumulée .....   | 26 |
| 3.3.2 Standardisation .....  | 27 |
| 3.3.3 Statistiques descriptives.....   | 29 |
| 3.3.4 Fonctions de réponse .....   | 29 |
| 3.3.5 Diagramme de fréquence des cernes incomplets et diagnostiques et des chutes de<br>croissance ..... | 31 |

|   |    |
|---|----|
| 4. RÉSULTATS .....  | 33 |
| 4.1 Croissance comparée du pin gris et de l'épinette noire selon le drainage .....  | 33 |
| 4.1.1 Caractérisation de la croissance.....   | 33 |
| 4.1.2 Comparaison des patrons de croissance standardisés inter-arbres et inter-milieus.....   | 35 |
| 4.1.3 Statistiques descriptives.....  | 39 |
| 4.2 Croissance comparée du pin gris selon le drainage.....  | 42 |
| 4.2.1 Caractérisation de la croissance.....   | 42 |
| 4.2.2 Comparaison des patrons de croissance standardisés inter-arbres et inter-milieus et<br>variabilité intra-site.....                    | 44 |
| 4.2.3 Statistiques descriptives.....  | 52 |
| 4.3 Relations avec le climat.....   | 55 |
| 4.3.1 Fonctions de réponses groupe « étude » .....  | 55 |
| 4.3.2 Fonctions de réponses groupe « témoin » .....   | 65 |
| 4.3.3 Particularités de la croissance: chronologies de cernes diagnostiques, incomplets et<br>chutes de croissance (groupe « étude ») ..... | 69 |
| 5 . DISCUSSION .....  | 75 |
| 5.1 Croissance comparée du pin gris et de l'épinette noire selon le drainage .....  | 75 |
| 5.2 Croissance comparée du pin gris selon le drainage .....   | 76 |
| 5.3 Relations avec le climat.....   | 77 |
| 5.3.1 Fonctions de réponses.....  | 77 |
| 5.3.2 Particularités: chutes de croissance (groupe « étude ») .....   | 78 |
| 6 . CONCLUSION .....  | 83 |
| RÉFÉRENCES.....   | 87 |

## LISTE DES TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| Tableau 3.1: Origine et âges des peuplements échantillonnés (groupes « étude » et « témoin »)<br>(référence : figure 3).....   | 19 |
| Tableau 3.2: Caractéristiques des sites échantillonnés (groupe « étude »).....   | 21 |
| Tableau 3.3: Récapitulatif des arbres par crêtes rocheuses (groupe « étude (L15) » où EM=<br>épinettes en milieu mésique, EX= épinettes en milieu xérique, PM= pins en milieu<br>mésique et PX= pins en milieu xérique). ..... | 22 |
| Tableau 3.4: Caractéristiques des sites échantillonnés (groupe « témoin »). .....  | 23 |
| Tableau 3.5: Récapitulatif des arbres par site (groupe « témoin »). .....  | 24 |
| Tableau 3.6: Paramètres, périodes et mois couverts par les calculs de fonctions de réponse. ....   | 30 |
| Tableau 4.1: Statistiques des séries brutes (groupe « étude »). .....  | 40 |
| Tableau 4.2: Statistiques des séries standardisées (groupe « étude »).....   | 42 |
| Tableau 4.3: Statistiques associées aux différentes crêtes échantillonnées (groupe « étude »).....   | 49 |
| Tableau 4.4: Coefficients de corrélation par milieu pour le groupe « étude » (données brutes et<br>standardisées). .....   | 50 |
| Tableau 4.5: Statistiques des séries brutes de largeurs de cernes des arbres selon les peuplements<br>échantillonnés. AR (1) : Autocorrélation d'ordre 1 (groupes « étude » et<br>« témoin »). .....                           | 53 |
| Tableau 4.6: Statistiques des séries standardisées (groupes « étude » et « témoin »). .....  | 54 |
| Tableau 4.7: Réponses aux températures moyennes mensuelles pour la période 1950-2000 (CRU)<br>(Groupe « étude ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives). .....   | 56 |
| Tableau 4.8: Réponses aux températures minimum pour la période 1917-1968 (station Fort-<br>Georges) (Groupe « étude ») (Surlignage gris= valeurs près du seuil de<br>signification).....                                       | 57 |
| Tableau 4.9: Réponses aux précipitations mensuelles pour la période 1950-2000 (CRU) (Groupe<br>« étude ») (Surlignage rouge= valeurs négativement significatives). .....   | 58 |
| Tableau 4.10: Réponses à la quantité de neige moyenne pour la période 1961-2005 (D. Tapsoba,<br>IREQ) (Groupe « étude ») (Surlignage gris= valeurs près du seuil de signification).<br>.....                                   | 59 |

|  |    |
|--|----|
| Tableau 4.11: Réponses à la hauteur de la neige pour la période 1961-2005 (D. Tapsoba, IREQ) (Groupe « étude ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives; surlignage rouge= valeurs négativement significatives). .....   | 60 |
| Tableau 4.12: Réponses à la densité de la neige pour la période 1961-2005 (D. Tapsoba, IREQ) (Groupe « étude ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives; surlignage rouge= valeurs négativement significatives). .....   | 61 |
| Tableau 4.13: Réponses à l'équivalent en eau de la neige pour la période 1961-2005 (D. Tapsoba, IREQ) (Groupe « étude ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives; surlignage rouge= valeurs négativement significatives). .....  | 61 |
| Tableau 4.14: Meilleurs régresseurs combinés pour l'épinette noire (Groupe « étude ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives; surlignage gris= valeurs près su seuil de signification).....   | 63 |
| Tableau 4.15: Meilleurs régresseurs combinés pour le pin gris (Groupe « étude ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives; surlignage gris= valeurs près su seuil de signification).....  | 63 |
| Tableau 4.16: Meilleurs régresseurs combinés pour les deux espèces (Groupe « étude ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives). .....  | 64 |
| Tableau 4.17: Pourcentages d'arbres présentant une réponse significative (Groupe « étude »)...   | 65 |
| Tableau 4.18: Réponses aux températures mensuelles pour la période 1950-1993 (CRU) (Groupe « témoin ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives; surlignage gris= valeurs près su seuil de signification).....  | 66 |
| Tableau 4.19: Réponses aux précipitations mensuelles pour la période 1950-1993 (CRU) (Groupe « témoin ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives; surlignage rouge= valeurs négativement significatives; surlignage gris= valeurs près su seuil de signification)..... | 67 |
| Tableau 4.20: Réponses aux précipitations moyennes de neige pour la période 1961-1994 (D. Tapsoba, IREQ) (Groupe « témoin ») (Surlignage rouge= valeurs négativement significatives; surlignage gris= valeurs près su seuil de signification). .....                                 | 68 |
| Tableau 4.21: Fréquence relative des cernes diagnostiques chez le pin gris du lac 15 (groupe « étude »).....   | 70 |
| Tableau 4.22: Fréquence relative des cernes incomplets chez le pin gris du Lac 15 (groupe « étude »).....  | 71 |

## LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| Figure 2.1: Aire de répartition du pin gris en Amérique du Nord (Ressources naturelles Canada).<br>.....  | 10 |
| Figure 2.2: La série de croissance définissant le modèle architectural de Rauh (adapté de Édelin,<br>1977).....   | 12 |
| Figure 3.1: Localisation des sites d'étude. ....  | 17 |
| Figure 3.2: Pin gris sur affleurement rocheux. ....   | 20 |
| Figure 3.3: Transition bas de pente-affleurement rocheux. ....  | 20 |
| Figure 4.1: Courbes d'accroissements cumulés pour les dendroséries de pin gris et d'épinette<br>noire (groupe « étude »). ....  | 34 |
| Figure 4.2: Patrons de croissance standardisés de pins gris et d'épinettes noires (groupe « étude<br>»).....  | 36 |
| Figure 4.3: Comparaisons inter-espèces et inter-milieus des dendroséries (groupe « étude ») (Les<br>encadrés attirent l'attention sur les périodes où le pin fait une incursion dans des<br>phases de croissance plus faibles alors que l'épinette poursuit une croissance<br>normale)..... | 38 |
| Figure 4.4: Courbes d'accroissements cumulés pour les six dendroséries de pin gris (groupes<br>"étude" et "témoin").....  | 43 |
| Figure 4.5: Les différentes forces de corrélations entre les séries de largeurs de cernes brutes et le<br>modèle d'ajustement d'exponentielle négative (groupes « étude » et « témoin »).....   | 45 |
| Figure 4.6: Comparaison entre l'exponentielle négative et la spline dans le cas d'un individu<br>ayant un faible coefficient de corrélation avec l'exponentielle négative.....  | 45 |
| Figure 4.7: Courbes de croissance standardisées des différentes dendroséries de pins gris (groupes<br>« étude » et « témoin »). ....  | 47 |
| Figure 4.8: Comparaison des patrons de croissance (standardisés) des pins gris provenant des<br>différentes crêtes et milieux (groupe « étude »). ....  | 51 |
| Figure 4.9: Chronologie de cernes diagnostiques (groupe « étude »). ....  | 69 |
| Figure 4.10: Pourcentage d'individus présentant une chute de croissance par année pour la période<br>1920-2010 (groupe « étude »). ....   | 72 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 4.11: Synchronisme des chutes de croissance retrouvées chez le pin gris (groupe « étude »).....  | 73 |
| Figure 5.1: Relation entre la croissance du pin gris en milieu sec et les précipitations. ....  | 79 |
| Figure 5.2: Comparaison entre une forêt ayant subi une sévère défoliation par le diprion de Swaine (en médaillon) et le site d'échantillonnage du groupe "étude" (médaillon : Ressources naturelles Québec). .... | 81 |
| Figure 6.1: Pin gris âgé de 351 ans retrouvé aux abords du Lac 15. ....   | 84 |

# 1 . INTRODUCTION

À l'échelle planétaire, la tendance à l'augmentation des températures moyennes est clairement inscrite dans les registres. Selon les données du Climatic Research Unit (CRU, 2007), onze des douze années de la période 1995–2006 figurent parmi les années les plus chaudes depuis le début de la révolution industrielle vers 1850. Des changements observés depuis 1950, plusieurs sont sans précédent sur les dernières décennies, voire millénaires. Les trois dernières décennies ont été successivement plus chaudes à la surface de la Terre que toutes les précédentes depuis 1850 (GIEC, 2013). Dans l'hémisphère Nord, la période 1983–2012 a probablement été la période de 30 ans la plus chaude des 1400 dernières années. Ces changements ont des répercussions sur les systèmes physiques (neige, glace et pergélisol, hydrologie, processus côtiers...) et sur les systèmes biologiques (terrestres, marins et dulcicoles...).

Le changement climatique a aussi des conséquences économiques. Alors qu'en moyenne les régions terrestres des moyennes latitudes de l'hémisphère Nord ont subi une augmentation des précipitations depuis 1900 (GIEC, 2013), à l'échelle régionale, le climat du Québec boréal s'est réchauffé et a enregistré une diminution sensible des précipitations de l'ordre de 5 à 15% de 1976 à 2005 (CRU, 2007). Ce bilan décennal négatif des précipitations pourrait avoir de graves conséquences sur le plan économique s'il s'avère faire partie d'une nouvelle tendance, puisque 50% de la production hydroélectrique de la province provient du secteur boréal. Mais, il ne pourrait s'agir que d'une incursion négative dans une tendance à la hausse. Il faut un certain recul historique pour bien comprendre s'il s'agit d'une fluctuation statistique ou d'une tendance. Les registres disponibles actuellement sont de trop courte durée pour le déterminer. De fait, au vu de l'importance de la gestion des ressources hydriques pour le Québec, il apparaît essentiel d'intégrer ce bilan négatif dans une perspective chronologique plus étendue afin d'augmenter la précision des projections sur le XXIème siècle.

Dans le cadre d'un projet plus vaste qui utilise les archives naturelles afin de reconstituer certaines variables hydrologiques et climatiques dans le temps et dans l'espace (projet ARCHIVES), ce projet de maîtrise se concentre sur les arbres qui sont des organismes dont la croissance et la répartition sont étroitement liées au climat. Les formations forestières présentes sur le territoire du haut-boréal québécois sont des indicateurs de choix dans la compréhension des changements climatiques. Les cernes de croissance des arbres sont certainement les archives naturelles qui offrent la plus grande résolution temporelle, soit annuelle et même intra-annuelle. De plus, ils offrent l'avantage d'une grande interprétation spatiale en raison de l'abondance des arbres sur le territoire. Les longues séries sont difficiles à réaliser dans le Nord québécois, notamment en raison de l'inaccessibilité du territoire, de la rigueur du climat et des feux fréquents qui limitent l'âge des arbres. Les arbres vivants permettent de créer des séries dendrochronologiques sur une courte échelle de temps, soit quelques centaines d'années, alors que les arbres subfossiles permettent de créer des dendroséries pouvant couvrir le millénaire (Arseneault, 2010).

Cette étude de maîtrise a été menée en secteur boréal québécois, plus précisément dans le domaine de la pessière à lichens qui occupe toute la sous-zone de la taïga du 52<sup>e</sup> au 55<sup>e</sup> parallèle Nord. La strate arborescente est principalement composée de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) et d'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] BSP). La forêt boréale est un milieu complexe qui évolue et vit au rythme des perturbations. Plusieurs végétaux composant cet écosystème ont besoin des perturbations naturelles telles que le feu pour assurer leur persistance et leur régénération dans la mosaïque forestière. Le cycle de feux dans la taïga occidentale du Québec oscille autour de 100 à 115 ans (Payette *et al.*, 1989; Parisien et Sirois, 2003), une période qui permet la coexistence du pin gris et de l'épinette noire. Le cycle de feux est plus court que la durée de vie des espèces dominantes, qui est de 150-165 ans en moyenne pour le pin et de 250-280 ans pour l'épinette (de Groot *et al.*, 2003; Le Goff et Sirois, 2004; Héon, 2010), ce qui permet une recolonisation par les mêmes espèces présentes avant feu. Ces deux espèces ont la capacité de se régénérer après feu grâce à leurs cônes sérotineux (pin gris) et semi-

sérotineux (épinette noire) et elles sont un reflet des variations des régimes de perturbations. La composition forestière et les propriétés des écosystèmes sont donc intrinsèquement liées à la fréquence des feux de forêt (Bergeron, 1998).

La capacité du pin gris à subsister dans la mosaïque forestière après un feu provient en partie de sa maturité sexuelle hâtive. Il atteint la maturité sexuelle plus rapidement que l'épinette noire, soit vers l'âge de 5-10 ans contre 30 ans et plus chez l'épinette (Cayford et McRae, 1983; Caron et Powell, 1989; Héon, 2010). Le pin gris est une espèce pyrophyte qui envahit facilement les zones perturbées par le feu, puisque les cônes s'ouvrent sous l'effet de la chaleur et libèrent les graines qu'ils contiennent. Un cycle de feu court favorise la colonisation par le pin gris, ce qui peut éliminer la concurrence avec les autres espèces. Par exemple, pour un intervalle de feu de 30 ans, le pin pourra se régénérer alors que l'épinette ne sera pas assez mature pour recoloniser le milieu de façon sexuée. Dans un tel cas, il y aurait possibilité d'une « pinédisation ». À l'inverse, un cycle de feu plus long favoriserait l'épinette noire aux dépens du pin gris (de Groot *et al.*, 2003; Le Goff et Sirois, 2004). En l'absence de feu ou en présence d'un long cycle de feu, l'épinette pourra se régénérer de façon végétative par marcottage, c'est-à-dire par l'enracinement des branches basales.

La présente étude a pour objectif de mieux comprendre l'écologie du pin gris. Une meilleure compréhension pourrait permettre d'identifier les paramètres qui influencent sa croissance, son évolution, et les variables climatiques et écologiques auxquelles il pourrait être sensible. Le pin gris est une espèce abondante, mais peu utilisée en dendroécologie comparativement à l'épinette noire, principalement en raison de sa durée de vie relativement courte. Puisqu'il s'établit dans des conditions différentes de l'épinette, préférant les milieux secs et pauvres en nutriments comme les terrasses fluvio-glaciaires et les crêtes rocheuses (Despots et Payette, 1993), il est possible qu'il réagisse à des variables climatiques différentes, notamment au principal facteur limitant de son environnement, l'eau.

Des études comparant les deux espèces ont été réalisées, mais peu d'entre elles traitent de leur réponse respective au climat du grand Nord québécois. Plus au sud, l'étude de Hofgaard *et al.*, (1999), portant sur les milieux xériques (90% de crêtes rocheuses) et couvrant un transect latitudinal s'étendant du 48<sup>e</sup> au 50<sup>e</sup> parallèles Nord, stipule que la croissance radiale des deux espèces est négativement influencée par des températures au-dessus de la moyenne en fin d'été et qu'elle est positivement influencée par un début de saison de croissance hâtif, donc par les températures printanières. Plus spécifiquement, les facteurs climatiques ayant le plus d'influence sur la croissance radiale de l'épinette noire sont un début de saison de croissance hâtif (températures du printemps) et un apport en précipitations plus élevé que la moyenne au début de l'été dans le sud du transect. En ce qui concerne le pin gris, il réagit positivement à un prolongement de la saison de croissance et négativement aux précipitations d'octobre, ce qui, selon les auteurs, pourrait être une conséquence des chutes de neige hâtives causant la fin de la saison de croissance. Un peu plus au nord, l'étude de Huang *et al.*, (2010), portant sur des milieux mésiques et sub-mésiques situés à l'intérieur d'un transect latitudinal allant du 46<sup>e</sup> au 54<sup>e</sup> parallèles Nord, confirme que le pin gris réagit négativement aux précipitations d'octobre. De plus, l'étude mentionne une réaction positive aux températures de novembre et aux précipitations de mars. De façon générale, les auteurs énoncent que l'épinette noire et le pin gris possèderaient un signal similaire du sud au nord, c'est-à-dire qu'ils contiennent un nombre similaire de signaux communs le long du gradient sud-nord, suggérant qu'ils répondent au climat de façon similaire. Les deux espèces ont une croissance qui est influencée positivement par l'hiver de l'année courante et le printemps suivant, ainsi que par la température tout au long de la saison de croissance, et ce, tout au long du gradient. Cette étude permettra de vérifier si ces résultats peuvent s'appliquer à des populations situées plus au nord.

Cette étude pose l'hypothèse que le pin gris serait plus sensible aux précipitations que l'épinette noire. En admettant que cette hypothèse soit vraie, cette espèce aurait la capacité d'enregistrer les écarts hydriques de manière plus directe que l'épinette noire. Il

serait ainsi plus aisé de dégager les signaux climatiques recherchés et ainsi réduire le risque de confondre ces derniers avec les signaux provenant de l'environnement même de l'arbre.

Afin de valider ou de réfuter ce postulat, l'étude s'articulera autour de différents types d'approches et d'analyses. Tout d'abord, une caractérisation de la croissance du pin gris en milieux mésiques et xériques sera effectuée afin de déceler les différences entre les deux milieux en ce qui a trait aux patrons de croissance et aux différents paramètres statistiques. Ensuite, une caractérisation de la croissance de l'épinette noire en milieux mésiques et xériques sera aussi établie dans le but de comparer la croissance des deux espèces dans les deux milieux afin de déterminer en quoi le pin gris est différent, toujours par le biais des patrons de croissance et des paramètres statistiques. Et finalement, la relation au climat des deux espèces dans les deux milieux sera analysée par le calcul de fonctions de réponse. Ces comparaisons et analyses permettront de valider ou réfuter l'hypothèse stipulant que le pin gris aurait une capacité d'enregistrement des épisodes secs supérieure à celle de l'épinette.

Avec ces objectifs en tête, des épinettes noires et des pins gris ont été échantillonnés dans deux milieux contrastés, soit des sommets de crêtes rocheuses (caractérisés par des conditions xériques) et des bas de pentes (caractérisées par des conditions mésiques). Cette approche permettra, dans un premier temps, de comparer la croissance du pin gris en milieux mésiques et xériques, et dans un second temps, de déterminer si la disponibilité en eau est un facteur déterminant dans la croissance des deux espèces sous un même climat.



## 2 . ZONE D'ÉTUDE

### 2.1 Le milieu

La forêt boréale est la zone forestière la plus nordique de l'hémisphère Nord. Elle constitue l'un des plus grands types de forêt du monde avec la forêt tropicale et la forêt tempérée. La superficie de la forêt boréale sur la planète est de 6 millions de km<sup>2</sup>. Elle forme une ceinture de 1000 km du nord au sud qui s'étend en Amérique du Nord, en Asie et en Europe. Ce domaine forestier représente 33% des forêts mondiales et recouvre 11% de la surface terrestre, et 30% de ce grand écosystème se retrouve au Canada (Ressources naturelles Canada, 2013). Le nord de la région boréale est la taïga, zone de transition écologique entre la forêt et la toundra arctique. L'âge moyen des arbres que l'on trouve en forêt boréale canadienne est de 100 ans, et le cycle de feu peut varier de 50 à 250 ans (Wein et McLean, 1983; Hammond, 1994).

La forêt boréale se démarque par l'abondance de ses peuplements de conifères. Les populations équiennes d'arbres à cônes sérotineux (pin gris) et semi-sérotineux (épinette noire) y sont dominantes. Les principales espèces rencontrées sont *Picea mariana* (Mill.) BSP, *P. glauca* (Moench) Voss, *Abies balsamea* (L.) Mill. et *Pinus banksiana* Lamb. Les conifères sont bien adaptés aux conditions difficiles de cet environnement, notamment un climat froid et des sols minces. En effet, les sols de la taïga sont constitués de dépôts de surface résultant de la dernière glaciation où la presque totalité de la région de la forêt boréale canadienne était recouverte de glace. La géologie et la topographie de la région sont donc des reliquats de l'action géomorphologique et climatique de cette dernière période glaciaire.

## 2.2 Histoire glaciaire de la région

La zone à l'étude fait partie de la région des Basses Terres de la Baie de James qui ont subi une évolution géomorphologique complexe au Tardiglaciaire (Hardy, 1977). Le terme tardiglaciaire correspond à la dernière phase du Pléistocène, qui précède la période actuelle, l'Holocène. Le Tardiglaciaire débute lors du dernier maximum glaciaire et se termine au Dryas récent. L'utilisation des données existantes des niveaux relatifs de la mer (Relative Sea Level : RSL) ont permis de définir que le maximum de la glaciation (Last Glacial Maximum : LGM) s'est produit de 26,5 à 19,0 ka (Clark *et al.*, 2009). Le modèle obtenu est caractérisé par une chute du niveau de la mer d'environ 130 m lors du LGM, ce qui concorde avec des estimations indépendantes (Clark *et al.*, 2009). Le Dryas récent, par ailleurs, est caractérisé par un refroidissement bref et intense ayant duré de 12,9 ka à 11,7 ka (Kaplan *et al.*, 2010).

Le paysage de la région de la Baie de James a été marqué par la scission de l'inlandsis laurentien qui a donné naissance à deux dômes résiduels vers 9 500 ans BP (Hardy, 1976) : le glacier du Nouveau-Québec et le glacier d'Hudson. Ces deux glaciers se sont retirés l'un vers le nord-est et l'autre vers le nord-ouest au contact des eaux profondes du lac Ojibway. Le retrait du glacier du Nouveau-Québec s'est effectué avec de courtes pauses et un arrêt majeur défini par la moraine de Sakami. Le lac Ojibway s'est étendu vers l'est, allant jusqu'à la moraine de Sakami et au-delà de la Grande rivière au nord (Hardy, 1977). Il se serait drainé vers le nord à la hauteur du 80° de longitude ouest, permettant ainsi l'invasion de la Mer de Tyrrell (Hardy, 1977). Sur les versants ontarien et québécois, plusieurs datations au  $^{14}\text{C}$  indiquent que la Mer de Tyrrell a envahi les Basses Terres de la Baie de James et de la Mer d'Hudson il y a environ 7900 ans (Skinner, 1973). Les rivages aujourd'hui émergés par suite du relèvement isostatique se trouvent à une altitude atteignant 290 m sur le versant est et 198 m sur le versant sud. La vidange du lac, l'invasion marine et la réavancée glaciaire de Sakami sont des événements datés à 7900 ans BP (Hardy, 1977).

La couverture de dépôts quaternaires des Basses Terres de la Baie de James est discontinue sur le socle (Hardy, 1976). Les sédiments ont été mis en place au cours de la déglaciation, lors des épisodes lacustre et marin. Le till argileux présent et les argiles lacustres sédimentées des eaux profondes du lac Ojibway constituent les dépôts de surface des basses terres de la Baie de James. La couverture argileuse peut varier de 10 à 20 m au niveau des terrains bas des interfluves et de 5 à 10 m pour les terrains situés en plus haute altitude (Hardy, 1976, 1977).

### **2.3 Établissement du pin gris et de l'épinette noire**

Afin de retracer l'année d'établissement des deux espèces pionnières que sont le pin gris et l'épinette noire dans la région, Desponts et Payette (1993) ont procédé à une analyse des microfossiles dans les paléosols. Ils ont utilisé la technique de datation au radiocarbone dans l'optique d'établir une chronologie de l'histoire postglaciaire de ces deux espèces. Leurs résultats suggèrent que l'épinette noire a été la première espèce à coloniser le territoire vers 6000 ans BP, tout de suite après la déglaciation, alors que des populations de pin gris de faible densité seraient apparues sur les terrasses sableuses vers 3000 ans BP. L'implantation massive du pin gris suite à d'importants feux et sa présence généralisée dans l'aire de répartition actuelle est datée entre 2400 et 2000 BP (Desponts, 1990).

Depuis cette période, des populations mixtes et monospécifiques de pin gris et d'épinette noire se sont développées de façon concomitante, ce qui indique que les deux espèces sont bien adaptées aux conditions climatiques et au régime des perturbations dominé par les feux sévissant dans la région. L'expansion du pin gris sur les terrasses sableuses a été favorisée par des feux fréquents et intenses, ce qui aurait limité la compétition par l'épinette noire pendant plusieurs décennies. L'établissement du pin gris

sur les terrasses sableuses a généré des populations mixtes avec l'épinette noire et les deux espèces coexistent depuis environ 2000 ans au minimum (Despots et Payette, 1993).

## 2.4 Écologie du pin gris

### 2.4.1 Aire de répartition du pin gris

Le genre *Pinus* est le plus important de la famille des *Pinaceae*, laquelle comprend dix genres et environ 200 espèces. Le genre *Pinus* comprend une centaine d'espèces, dont 37 sont présentes en Amérique du Nord (Dignard, 2006). Parmi tous les pins sur le continent, le pin gris présente la plus vaste répartition géographique. Il est le plus répandu au Canada (Figure 2.1).



Figure 2.1: Aire de répartition du pin gris en Amérique du Nord (Ressources naturelles Canada).

Quatre espèces de pins se retrouvent naturellement au Québec: le pin gris, le pin rouge (*Pinus resinosa* Ait.), le pin blanc (*Pinus strobus* L.) et dans une moindre mesure le pin rigide (*Pinus rigida* Mill.). Au Québec, la distribution du pin gris est déterminée par trois barrières physiques : premièrement, la limite maritime, à l'ouest, à environ 12 km de la côte, en raison de l'humidité et d'un cycle de feux plus long (Despots et Payette, 1992; Parisien *et al.*, 2004). Deuxièmement, la limite nordique, où son expansion a probablement été restreinte par la disponibilité des semences, la compétition ou un régime de feux défavorable plutôt que par des conditions thermiques (Despots, 1990). La période de rotation des feux augmente considérablement depuis la forêt boréale jusqu'à la toundra (Payette *et al.*, 1989), et des intervalles plus longs entre les feux ne sont pas susceptibles d'entretenir sa persistance, ce qui expliquerait que sa limite de répartition coïncide avec le changement de biome (Despots, 1990). Troisièmement, la limite continentale, à l'est et au sud de son aire de distribution, en fonction de l'altitude. Le pin gris a la capacité de s'établir dans des milieux plutôt secs et pauvres, tels que les terrasses sableuses, les milieux graveleux et les crêtes rocheuses (Rousseau, 1974; Despots et Payette, 1993). Cette aptitude est liée à son système racinaire très développé. Après la première saison de croissance, les racines des plantules peuvent atteindre une profondeur de 13 à 25 cm. Après deux saisons de croissance, elles peuvent atteindre de 28 à 33 cm de profondeur et le système latéral peut s'étendre de 46 à 61 cm en largeur. Sur un sol profond et bien drainé, le système racinaire peut atteindre 2,70 mètres de profondeur (Burns et Honkala, 1990). Le système racinaire du pin gris est performant et limité dans sa croissance en fonction du milieu qu'il occupe.

#### **2.4.2 Caractéristiques physiologiques**

Le pin gris est un arbre de taille moyenne, d'environ 13 à 20 mètres de hauteur, pouvant atteindre 30 mètres dans certaines conditions. Le pin gris pousse sur des sols moins fertiles que le pin rouge (*Pinus resinosa*) et le pin blanc (*Pinus strobus*). Il pousse très

rapidement au cours de ses 20 premières années. Le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) est de 30 à 40 centimètres, et de 60 centimètres au maximum. L'aubier du pin gris est blanchâtre et peut représenter plus de la moitié du volume du tronc de l'arbre. Son bois de duramen est brun clair avec parfois une teinte orangée. Ses caractéristiques mécaniques sont moyennes: il résiste moyennement à la flexion, à la compression et aux chocs.

Le pin gris a un développement qui suit le modèle architectural de Rauh, comme la majorité des conifères, en raison de l'importance systématique, biogéographique et numérique des genres concernés (Édelin, 1977). Ce modèle se caractérise par un tronc monopodial à croissance rythmique, qui confère aux branches une disposition verticillée ou subverticillée (Figure 2.2). Les branches sont orthotropes et morphologiquement identiques au tronc (Halle et Oldeman, 1970).

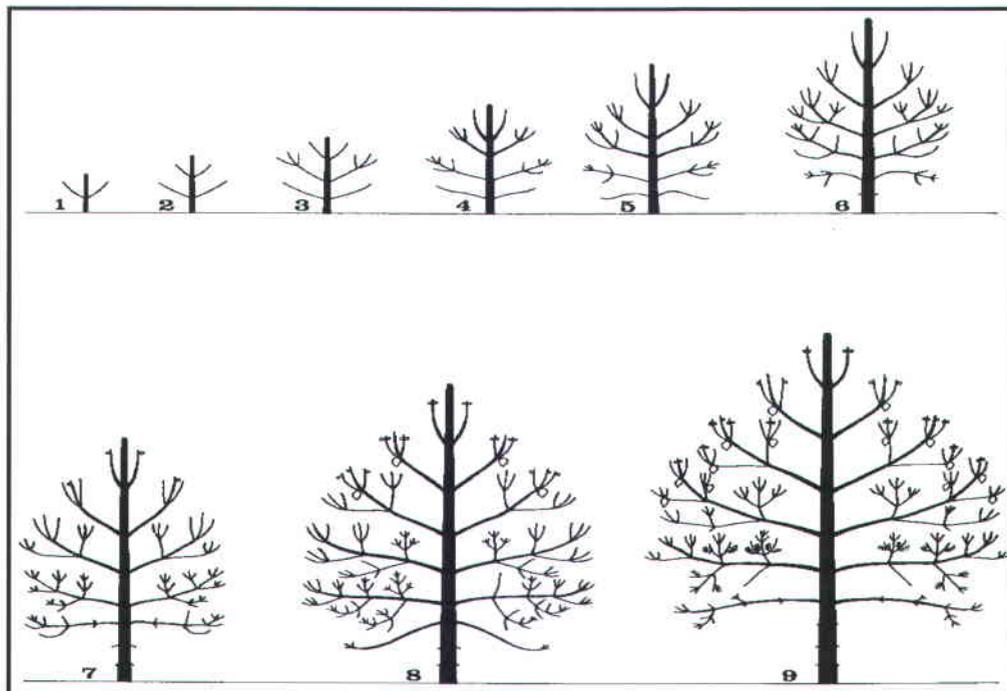


Figure 2.2: La série de croissance définissant le modèle architectural de Rauh (adapté de Édelin, 1977).

### 2.4.3 Perturbations

#### Feu

Le pin gris est surnommé le « fils du feu » puisqu'il dépend de ce dernier pour sa régénération; il s'agit d'une espèce dite pyrophyte. En effet, il possède des cônes sérotineux (scellés par de la cire) qui ont besoin d'une température minimale de 50°C pour s'ouvrir et laisser s'échapper les semences contenues à l'intérieur (Cameron, 1953; Beaufait, 1960). La plupart du temps, cette température est atteinte lors des feux, et plus rarement, suite à une journée chaude ou a exposition prolongée au soleil. Il s'établit donc dans des milieux secs où la fréquence des feux est élevée et où très peu de végétation s'établit. À la limite ouest de son aire de répartition dans le nord de la forêt boréale québécoise, où les grands feux sont fréquents, la distribution du pin gris est principalement fonction du régime des feux. À la limite est, les individus sont plus âgés et sont répartis sur un de leurs habitats de préférence, les dépôts glaciaires. En l'absence de feux fréquents, l'espèce tend à se réfugier en milieu sub-optimal, soit les crêtes rocheuses et les tourbières bien drainées (Parisien *et al.*, 2004).

Les principaux types de feux à sévir dans la forêt boréale fermée sont les feux de cimes, alors que les feux de surface caractérisent la forêt ouverte au nord. La densité d'individus et la sévérité des feux peuvent avoir un effet sur la régénération et la répartition du pin gris dans les différentes strates végétales. Par exemple, une étude menée par Arseneault (2001) démontre qu'un site ayant subi un feu de cime de faible sévérité aura une plus forte densité de pin gris dans l'étage dominant, une plus faible densité de pins dans le sous-bois, ainsi qu'une plus forte abondance de *Cladina rangiferina* (L.) et de *Cladina stellaris* Opiz (Brodo) dans le tapis lichénique qu'un site ayant subi un feu de cime sévère. Cette relation entre le type ainsi que la sévérité des feux

et le rétablissement des populations arborescentes post-incendie pourrait être en partie responsable de la disparité végétale retrouvée en différents sites de la forêt boréale (Arseneault, 2001).

### **Insectes**

Le pin gris est une espèce hôte de différents insectes et parasites selon la région où se trouvent les peuplements. Il existe au moins 58 espèces ou groupes d'insectes s'attaquant au pin gris, et de ce nombre, seulement 25 sont considérés comme importants (Howse, 1984). Les forêts de pin gris sont principalement attaquées par la tordeuse du pin gris (*Choristoneura pinus* Freeman) et le diprion de Swaine (*Neodiprion swainei* Middleton). Le nodulier du pin gris (*Petrova albicapitana* Busck) est considéré comme ayant une influence modérée (Howse, 1984).

Longtemps confondue avec la tordeuse des bourgeons de l'épinette, la tordeuse du pin gris a été reconnue comme espèce distincte en 1953 (Ressources naturelles Canada, 2013). L'aire de distribution coïncide avec celle du pin gris. Au Canada, on la retrouve principalement en Ontario, au Manitoba et en Saskatchewan. La tordeuse du pin gris est un défoliateur qui vit et se nourrit principalement des ramilles et des aiguilles et dont les dommages sont principalement situés dans la partie supérieure de la cime des arbres. La destruction de la partie supérieure entraîne une compétition entre les branches latérales pour l'établissement d'une nouvelle dominance apicale. Une réduction de croissance en résulte, et par suite d'infestations répétées, l'arbre peut mourir. Visuellement, sa présence peut se remarquer par la couleur brun-rougeâtre que présente le feuillage endommagé et desséché (Ressources naturelles Canada, 2013).

Le diprion de Swaine est le plus important ravageur du pin gris. Sa distribution couvre généralement le territoire occupé par son espèce hôte. De vastes peuplements ont été détruits au Québec et en Ontario depuis 1936, année à laquelle a débuté son recensement. Depuis ce temps, il est reconnu comme un ravageur de vastes peuplements

de pin gris qui entraîne la mort des arbres (Martineau, 1984). Depuis 1940, quelques épidémies ont ravagé les peuplements purs de pin gris qui croissent au Québec méridional, entre les 47° et 48° parallèles. Dans les régions plus septentrionales, le développement de l'insecte semble entravé par le froid (ministère des Ressources naturelles Québec, 2013). Le diprion de Swaine est un défoliateur libre qui se nourrit du tissu et de la feuille des végétaux et qui s'attaque principalement aux peuplements âgés et préfère le vieux feuillage. Il arrive toutefois que lors de fortes pullulations, le feuillage annuel soit attaqué. Lorsque la défoliation n'atteint que le vieux feuillage, l'arbre peut survivre, alors que la défoliation totale entraîne généralement la mort de l'arbre dès l'année suivante (Ressources naturelles Canada, 2013). En vue aérienne, les ravages du diprion de Swaine se démarquent par des cimes brun-grisâtre contrastant avec le vert du feuillage sain des arbres non affectés.

Le nodulier du pin gris se retrouve partout au Canada. Son aire de distribution s'étend de la Nouvelle-Écosse à l'intérieur de la Colombie-Britannique et, vers le nord, probablement jusque dans la partie sud des Territoires du Nord-Ouest. Les populations de cet insecte peuvent fortement se disperser en vol, et ce, même sans vent (Ressources naturelles Canada, 2013). Les relevés du ministère des Ressources naturelles du Québec font état de la présence du nodulier dans les plantations du Québec depuis environ 25 ans (Boulet, 1984; Grenon, 1998). Il se nourrit des tissus du phloème et s'en prend aux arbres de tous âges, préférant toutefois des pins de 0,5 à 5,0 m. Les dommages causés par le nodulier sont le résultat de l'alimentation larvaire. Il peut en résulter des pousses cassées et les dommages causés peuvent affecter ou tuer la pousse apicale terminale ainsi qu'une certaine réduction de croissance (Ressources naturelles Canada, 2013). La présence du nodulier se remarque par les nodules qu'il fabrique au niveau de la fourche des branches et des rameaux des arbres, d'où son appellation (ministère des Ressources naturelles Québec, 2013).

Bien que la présence de ces ravageurs ne soit pas répertoriée dans la zone d'étude, rien ne permet d'affirmer qu'ils ne peuvent s'y trouver.



### 3 . MATÉRIEL ET MÉTHODES

#### 3.1 Sites d'étude et échantillonnage

La zone d'étude se situe dans le Haut-Boréal québécois, plus précisément dans le secteur jamésien de la forêt boréale. Les données utilisées afin de comparer la croissance de l'épinette noire et du pin gris en milieux mésiques et xériques proviennent de cinq sites différents (Figure 3.1). Tous les individus étudiés sont issus de peuplements établis après-feu et sont donc tous approximativement d'un âge et d'une taille similaires. Ils sont perçus comme égaux en ce qui a trait à la compétition pour la lumière et les nutriments.

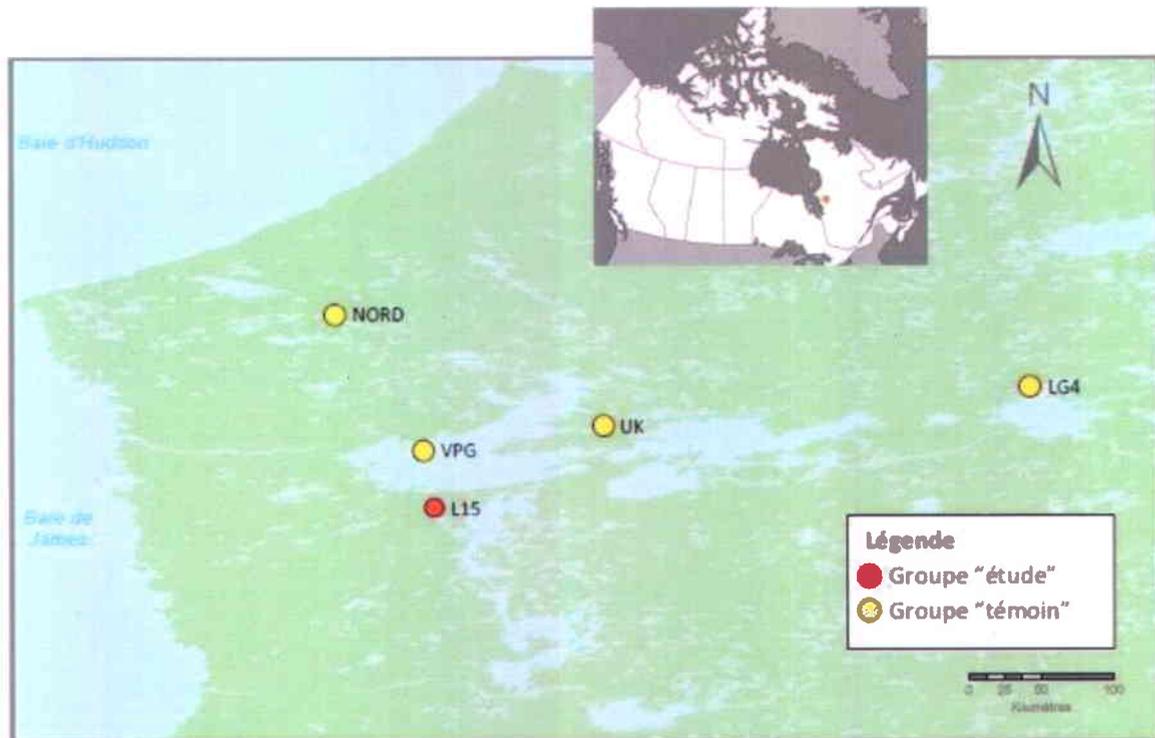


Figure 3.1: Localisation des sites d'étude.

## Origine et âge moyen des peuplements

Les peuplements de pin gris et d'épinette noire considérés dans cette étude, en milieu mésique et en milieu xérique, sont tous équiennes en étant issus de feu. Les cicatrices retrouvées sur quelques individus de pin gris du groupe « étude » permettent d'authentifier un feu survenu autour de 1841, ce qui correspond à l'âge moyen de 158 ans des arbres des deux séries de pins gris (L15-PM et L15-PX) et de 145 ans pour celles des épinettes (L15-EM et L15-EX). Pour le groupe « témoin », qui repose sur des arbres échantillonnés en 1994 et en 1995, selon Bégin *et al.*, (1998), il y a différentes dates de feu. La série LG4 proviendrait d'un feu ayant eu lieu dans les années 1920; les arbres ont une moyenne d'âge de 66 ans. Le site NORD aurait brûlé en 1833; les arbres ont en moyenne 156 ans. Les arbres composant la série UK sont issus de deux incendies, soit 1868 et 1929 (datés par des cicatrices de feu), et ils ont une moyenne d'âge de 71 ans. Enfin, dans le cas de la série VPG, le feu à l'origine du peuplement n'a pas été daté au moyen de cicatrices, mais avec une moyenne d'âge des arbres de 83 ans, et le plus vieil individu de la cohorte dont l'origine est datée à 1887, il est fort probable que les arbres sont issus d'un feu ayant eu lieu à la fin des années 1870. En somme, les peuplements de pin gris étudiés ont entre 62 et 210 ans avec une moyenne d'âge de 115 ans (Tableau 3.1). Leur période de vie variée selon les sites permet de croiser des peuplements à différents stades de vie, dans des conditions de drainage contrastées pour les mêmes épisodes climatiques régionaux.

**Tableau 3.1: Origine et âges des peuplements échantillonnés (groupes « étude » et « témoin ») (référence : figure 3).**

| Série  | Année du feu à l'origine du peuplement | Âge inférieur | Âge supérieur | Âge moyen |
|--------|--|---------------|---------------|-----------|
| L15-EM | ± 1841*                                | 122           | 196           | 147       |
| L15-EX | ± 1841*                                | 86            | 162           | 142       |
| L15-PM | ± 1841*                                | 144           | 162           | 156       |
| L15-PX | ± 1841*                                | 68            | 210           | 159       |
| LG4    | Décennie 1920*                         | 62            | 68            | 66        |
| NORD   | 1833*                                  | 86            | 161           | 156       |
| UK     | 1868* et 1929*                         | 58            | 125           | 71        |
| VPG    | Fin décennie 1870                      | 54            | 107           | 83        |

\*Daté par cicatrice de feu

### 3.1.1 Groupe « étude »

Les individus composant les séries L15-EX, L15-EM, L15-PX et L15-PM ont été échantillonnés pour cette étude aux abords du Lac 15 situé au kilomètre 25 de la route Transtaïga. Ils constituent le groupe « étude ». Le site est composé d'un ensemble de crêtes rocheuses qui ont été choisies sur la base de plusieurs critères. Premièrement, les crêtes rocheuses sont des milieux xériques qui permettent d'étudier la croissance en milieu sec. De plus, entre les crêtes rocheuses se trouvent des dépressions où les précipitations s'écoulent, ce qui permet d'obtenir des individus en milieux sub-humides, voire mésiques. Deuxièmement, puisque ce sont des milieux majoritairement privés d'eau de par leur position topographique, la fréquence de feux y est élevée avec une population composée majoritairement de pin gris. Finalement, ce site a été épargné par les derniers feux importants qui sont survenus non loin de là; donc, il a été possible de trouver des individus assez âgés pour constituer des séries de référence afin d'étudier la croissance du pin gris, ainsi que celle de l'épinette noire, dans un but comparatif. Recueillir les échantillons en milieux xériques et mésiques des deux espèces à l'intérieur d'un même environnement limite au maximum la variabilité intra-site, permettant ainsi dégager de façon plus aisée les signaux climatiques.

## Profil des sites

Le drainage a été qualifié sur une échelle de un à sept; un étant un drainage excessif et sept étant un très mauvais drainage (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2011). Il varie de deux à quatre dans l'ensemble des crêtes (Tableau 3.2). Les signes observés sur le terrain laissent deviner une épaisseur moyenne du couvert nival entre de 50 à 80 cm. L'âge moyen des populations, équiennes et issues de feu, a été estimé à 100-150 ans (Tableau 3.3).

L'ensemble des sites constituent un milieu ouvert où cohabitent principalement pins gris et épinettes noires accompagnés de quelques mélèzes (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch) épars. Les crêtes sont majoritairement recouvertes de lichens (*Cladina rangiferina*, *C. stellaris*, *C. mitis*) et les dépressions sont peuplées par des éricacées (*Rhododendron groenlandicum*, *Empetrum nigrum*, *Kalmia augustifolia*, *Chamaedaphne calyculata*, *Vaccinium angustifolium*, *V. vitis-idaea*, *V. uliginosum*.), des sphaignes et des arbustes (*Betula glandulosa*).



**Figure 3.3: Transition bas de pente-affleurement rocheux.**



**Figure 3.2: Pin gris sur affleurement rocheux.**

**Tableau 3.2: Caractéristiques des sites échantillonnés (groupe « étude »).**

| Site | Nombre d'individus échantillonnés | Latitude  | Longitude  | Altitude (m) | Drainage (1 à 7) | Recouvrement strate licheno-muscinale (%) | Recouvrement strate arbustive (%) | Recouvrement strate arborescente (%) |
|------|-----------------------------------|-----------|------------|--------------|------------------|---|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 22   | 19                                | 53°21.599 | -77°04.589 | 203          | 2                | 50-75%                                    | <25%                              | 25-50%                               |
| 44   | 11                                | 53°21.625 | -77°04.605 | 200          | 2                | 50-75%                                    | 25-50%                            | 25-50%                               |
| 58   | 9                                 | 53°21.603 | -77°04.572 | 199          | 2                | 50-75%                                    | <25%                              | <25%                                 |
| 69   | 27                                | 53°21.582 | -77°04.545 | 194          | 3                | 50-75%                                    | 25-50%                            | 25-50%                               |
| 101  | 65                                | 53°21.544 | -77°04.515 | 191          | 2                | 50-75%                                    | <25%                              | 25-50%                               |
| 200  | 13                                | 53°21.373 | -77°03.178 | 193          | 3                | >75%                                      | 25-50%                            | <25%                                 |
| 219  | 2                                 | 53°21.202 | -77°03.145 | 204          | 4                | 50-75%                                    | 25-50%                            | 25-50%                               |
| 225  | 19                                | 53°21.304 | -77°03.243 | 202          | 3                | 50-75%                                    | 25-50%                            | 25-50%                               |

### Profil des arbres

Quatre-vingt-cinq (85) pins gris (en affleurement rocheux (L15-PX) et en bas de pente (L15-PM)) et 80 épinettes noires (en affleurement rocheux (L15-EX) et en bas de pente (L15-EM)), vivants, les plus droits possibles, ont été échantillonnés en coupe transversale à  $\pm 1$  mètre du sol, pour un total de 165 échantillons. Chaque individu a été caractérisé, ainsi que son micro-environnement, selon les critères suivants : pente au point d'enracinement, distance au plan d'eau (mètres), distance et circonférence des plus proches voisins, hauteur (mètres) et diamètre (centimètres), statut successional (dominant, co-dominant, dominé), origine de la tige (graine, marcotte), branches mortes (%), cicatrices (type, hauteur), type de dépôts (roc, till mince, till épais), présence de lichens arboricoles (nulle, faible, moyenne, forte), microtopographie (croquis), hauteur de la coupe (centimètres), présence de cônes (pin gris) (échelle de un à six, un correspondant à peu de cônes et six à une abondance de cônes) et marcottes (épinette noire) (en nombre) et végétation présente (deux mètres par deux mètres au pied de l'arbre). La prise en compte de ses paramètres a pour objectif de bonifier l'information à l'échelle individuelle et ainsi mieux cerner les facteurs qui influencent la croissance des individus à l'échelle de

leur environnement immédiat. Le tableau 3.3 récapitule le nombre d'arbres par espèces et par crêtes ainsi que l'âge moyen pour chaque catégorie.

**Tableau 3.3: Récapitulatif des arbres par crêtes rocheuses (groupe « étude (L15) » où EM= épinettes en milieu mésique, EX= épinettes en milieu xérique, PM= pins en milieu mésique et PX= pins en milieu xérique).**

| Site             | Âge       |              | Âge       |              | Âge       |              | Âge       |              | Nombre total | Âge moyen total |
|------------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|--------------|-----------------|
|                  | L15-EM    | moyen L15-EM | L15-EX    | moyen L15-EX | L15-PM    | moyen L15-PM | L15-PX    | moyen L15-PX |              |                 |
| 22               | 4         | 152          | 6         | 161          | 1         | 160          | 8         | 172          | 19           | 161             |
| 44               | 3         | 143          | 2         | 124          | 1         | 148          | 5         | 159          | 11           | 144             |
| 58               | 2         | 136          | 1         | 149          | 3         | 155          | 3         | 155          | 9            | 149             |
| 69               | 7         | 158          | 5         | 142          | 0         | -            | 15        | 172          | 27           | 157             |
| 101              | 15        | 144          | 18        | 137          | 6         | 156          | 26        | 157          | 65           | 149             |
| 200              | 7         | 146          | 2         | 142          | 1         | 160          | 3         | 161          | 13           | 152             |
| 219              | 1         | 149          | 0         | -            | 0         | -            | 1         | 152          | 2            | 151             |
| 225              | 6         | 149          | 1         | 138          | 7         | 155          | 5         | 144          | 19           | 147             |
| <b>Total/Moy</b> | <b>45</b> | <b>147</b>   | <b>35</b> | <b>142</b>   | <b>19</b> | <b>156</b>   | <b>66</b> | <b>159</b>   | <b>165</b>   | <b>151</b>      |

### 3.1.2 Groupe « témoin »

Le pool d'arbres du groupe « étude » est renforcé par des populations de pin gris déjà échantillonnées lors d'un projet précédent. Les séries LG4 (site GR4), NORD (site Lac Kwakutuwan), UK (site Lac UKAW) et VPG (site Île Venteuse) ont été étudiées dans le cadre d'une analyse dendrochronologique antérieure visant à connaître les effets climatiques du réservoir LG2 (Réservoir Robert-Bourassa) sur l'environnement forestier (Bégin *et al.*, 1998). Ils sont identifiés ici comme constitutifs du groupe « témoin ».

## Profil des sites

Les sites d'échantillonnage du groupe « témoin » sont homogènes sur le plan du drainage (milieux mésiques), de la pente et du substrat. Les pins gris provenant de ces sites sont majoritairement moribonds et ont un feuillage clairsemé (Tableau 3.4), mais possèdent une forme de croissance régulière. Ces sites forment un transect ouest-est d'environ 175 km le long de La Grande rivière (Bégin *et al.*, 1998).

**Tableau 3.4: Caractéristiques des sites échantillonnés (groupe « témoin »).**

| Site | Espèces  | Milieu  | Latitude | Longitude  | Caractéristiques des peuplements   |
|------|----------|---------|----------|------------|--|
| NORD | Pin gris | Mésique | 54°34' N | - 77°41' O | Arbres moribonds isolés les uns des autres<br>Feuillage clairsemé                                    |
| LG4  | Pin gris | Mésique | 54°43' N | -77°48' O  | Pessière noire à pin gris<br>Arbres moribonds de petite taille (h < 5m)                              |
| UK   | Pin gris | Mésique | 53°55' N | -76°03' O  | Peuplement monospécifique de pin gris moribonds  |
| VPG  | Pin gris | Mésique | 53°44' N | -77°11' O  | Port asymétrique des arbres dû à l'exposition du site à l'Ouest.<br>Arbres de petite taille (h < 4m) |

## Profil des arbres

Les arbres ont approximativement le même âge et la même taille (Tableau 3.5) à l'intérieur de chacun des sites, ils forment des peuplements homogènes et ont le même statut compétitif. Ils ont été choisis en fonction de l'absence de carie du bois (pourriture), de cicatrice ou de bois de réaction. Ils ont été échantillonnés en coupe transversale à une hauteur de 30 à 90 cm du sol, hauteur permettant d'obtenir des cernes réguliers. Cette uniformité a pour objectif de réduire les variations de croissance causées par les différences d'âge et de taille entre les arbres. L'échantillonnage a eu lieu entre août 1994 et juin 1995 (Bégin *et al.*, 1998).

**Tableau 3.5: Récapitulatif des arbres par site (groupe « témoin »).**

| <b>Site</b> | <b>Nombre d'arbres par série</b> | <b>Âge moyen</b> |
|-------------|----------------------------------|------------------|
| <b>NORD</b> | 22                               | 66               |
| <b>LG4</b>  | 32                               | 156              |
| <b>UK</b>   | 27                               | 71               |
| <b>VPG</b>  | 21                               | 83               |

## **3.2 Traitement des échantillons**

### **3.2.1 Groupe « étude »**

Les 165 échantillons du groupe « étude » ont été séchés à l'air libre et ont été poncés avec des papiers aux grains de différentes tailles, allant du 60 au 600  $\mu\text{m}$ . Ensuite, les cernes de croissance ont été dénombrés et mesurés sous loupe binoculaire (max 40 X) et table micrométrique Velmex (précision de 1  $\mu\text{m}$ ).

La datation des épinettes noires a été faite par dénombrement de leurs cernes de croissance. L'année de formation du dernier cerne est connue puisque les arbres étaient vivants au moment de l'échantillonnage. La confirmation de la datation a été réalisée à l'aide du logiciel d'interdatation COFECHA (Holmes, 1992).

La datation des pins gris a requis une technique différente. En supplément de leur croissance irrégulière, la grande majorité des arbres présentent des anomalies de croissance (chutes drastiques de croissance, cernes absents et incomplets) qui rendent le dénombrement des cernes trop incertain pour certifier la datation. Les quelques pins (12) ayant été datés par dénombrement ont servi d'assise pour une tentative d'interdatation dans le logiciel COFECHA, mais sans succès.

La méthode des cernes diagnostiques était donc la dernière option pour parvenir à dater les pins gris des deux milieux. Un retour sur les échantillons préalablement datés d'épinettes noires a permis d'établir une séquence de cernes diagnostiques. Le pin gris possède plusieurs de ces mêmes cernes. Donc, en repérant la séquence de cernes diagnostiques sur les échantillons de pin gris, il a été possible de procéder à une datation des pins gris, pour ensuite confirmer l'interdatation à l'aide du logiciel COFECHA. La séquence de cernes diagnostiques est présentée à la section 4.3.3.

### **3.2.2 Groupe « témoin »**

Ils ont été finement sablés, les cernes ont été dénombrés et datés en laboratoire sous loupe binoculaire (grossissement de 16 à 40X), et les largeurs de cernes ont été mesurées sur deux transects opposés (rayons) à l'aide d'un micromètre électronique (Henson, précision : 0,01 mm et Velmex, précision 0,002 mm) monté sous loupe binoculaire et reliée à un ordinateur (Bégin *et al.*, 1998).

## **3.3 Traitement des données**

### **3.3.1 Croissance cumulée**

Afin de caractériser la croissance des pins gris et des épinettes noires selon les caractéristiques stationnelles, des courbes d'accroissements cumulés ont été calculées à partir des chronologies de largeurs de cernes. Une courbe moyenne a été créée pour tous les sites et les toutes les espèces étudiées, c'est-à-dire pour les quatre populations de pin gris composant le groupe « témoin » (UK, NORD, VPG, LG4), et les deux de pin gris et d'épinettes composant le groupe « étude » (L15-PM, L15-PX, L15-EM, L15-EX). La courbe d'accroissements cumulés exprime l'accroissement en diamètre des arbres au cours du temps. Tout d'abord, chacune des séries élémentaires datées en année calendaire a été transformée en âge cambial afin de pouvoir par la suite obtenir une courbe moyenne par site et par espèce qui ne tient compte que de l'âge de l'arbre. Pour l'année un, la largeur correspond à la largeur du cerne de la première année. Pour l'an deux, il s'agit de la somme de l'an un plus l'an deux. Pour l'an trois, la somme accumulée en l'an deux plus la trois, et ainsi de suite. L'ensemble des courbes de croissance ainsi obtenues sont ensuite moyennées afin d'obtenir une courbe représentative de la croissance de chaque espèce pour chaque site. Pour chaque courbe moyenne un intervalle de confiance de 95% a également été calculé. Cette méthode a l'avantage de dresser un portrait fiable de l'accroissement radial des arbres selon l'espèce et selon le site. Toutefois, la croissance en hauteur n'étant pas prise en compte, il n'est pas question ici de productivité. De plus, bien que l'objectif soit d'étudier la fertilité des sites, il faut garder à l'esprit que la structure du peuplement, notamment sa densité, est également susceptible d'influer sur l'accroissement en diamètre des arbres. Puisque les cumuls sont présentés d'année en année par âge cambial, les effets de l'âge et les influences des différents paramètres climatiques n'y sont pas représentés, permettant de déterminer de façon claire quels sont les milieux où les espèces ont une meilleure croissance globale, et quelle espèce est la plus adaptée à un milieu donné.

### 3.3.2 Standardisation

La standardisation a pour objectif premier de transformer les valeurs de la largeur des cernes en indices de dimension uniforme et comparable, et dans un même temps d'enlever les tendances liées à l'âge et ses variations de croissance, ce qui permet de faire ressortir les variations de croissance en lien avec les facteurs environnementaux (Nicault *et al.*, 2010). Parmi les méthodes de standardisation utilisées en dendrochronologie, l'exponentielle négative a été retenue afin de répondre aux objectifs de l'étude. Cette méthode est bien adaptée lorsque l'arbre présente une forte croissance dans sa phase juvénile suivie d'une diminution progressive de la largeur de cernes, patron de croissance fréquent chez les individus provenant de forêts ouvertes. Elle permet également de conserver les variations de moyenne et de basse fréquence (Nicault *et al.*, 2010). Les fonctions splines sont les méthodes de standardisation les plus utilisées en dendrochronologie et sont principalement appliquées aux arbres des forêts fermées ne présentant pas une forte croissance au stade juvénile (Nicault *et al.*, 2010). Les séries de mesures brutes ont été linéarisées à l'aide de la fonction `i.detrend`, intégrée au module `dplR` (Dendrochronology Program Library in R) (Bunn, 2007), une composante du logiciel libre *R-Project* (R Core Team, 2012).

#### a) Groupe « étude »

L'exponentielle négative a été appliquée pour l'ensemble des séries d'épinettes noires du groupe « étude ». Pour les pins gris du groupe « étude », une alternance d'exponentielle négative et de spline ont été utilisées, privilégiant l'exponentielle lorsqu'applicable puisque dans le cas de certains pins gris, les indices obtenus avec l'exponentielle négative étaient trop grands ( $>3$ ); des indices supérieurs à trois créent un biais dans la standardisation et introduisent de « faux pics de croissance ». Dans de tels cas, la spline (fenêtre de 0,67) a été choisie de façon à conserver le maximum de données tout en permettant la construction d'une courbe régulière. Dans ces cas particuliers, il s'agissait

du meilleur compromis permettant à la fois de standardiser les mesures brutes et de conserver les indices dans un écart raisonnable afin d'obtenir des séries les plus complètes et représentatives possibles.

Sept individus sur 36 (19%) de la série en milieu xérique (L15-PX), possédant de bons coefficients de corrélation avec le modèle exponentiel négatif, ont dû être standardisés avec la spline (fenêtre de 0,67). Pour la série en milieu mésique (L15-PM), c'est neuf échantillons sur 16 (56%) qui ont dû être standardisés avec la spline.

Cent-dix-sept (117) arbres du groupe « étude » ont été retenus dans la construction de séries de référence pour l'analyse statistique: 30 épinettes noires sur affleurement (L15-EX), 35 épinettes noires en bas de pente (L15-EM), 36 pins gris sur affleurement (L15-PX) et 16 pins gris en bas de pente (L15-PM). Les arbres rejetés l'ont été pour cause d'une trop grande incertitude lors de l'interdatation.

#### **b) Groupe « témoin »**

Les mesures brutes des pins gris du groupe « témoin » ont toutes été standardisées à l'aide de l'exponentielle négative, puisque tous les indices étaient inférieurs à 3 (dans un souci d'uniformité le seuil établi avec le groupe « étude » a été appliqué aux séries du groupe « témoin »).

Cent-dix (110) pins gris du groupe « témoin » forment les séries de références utilisées pour l'analyse statistique: 22 pour la série LG4, 36 pour NORD, 27 pour UK et 21 pour VPG.

### 3.3.3 Statistiques descriptives

Les différentes statistiques présentées sont la sensibilité moyenne, l'autorégression d'ordre un, les coefficients de corrélation de Pearson ( $r$ ) et les valeurs d'EPS (Fritts, 1976).

La sensibilité moyenne et l'autorégression d'ordre un ont été calculées sur les valeurs de largeurs de cernes brutes à l'aide de la fonction `rwl.stats`, intégrée au module `dplR` (Dendrochronology Program Library in R) (Bunn, 2007), une composante du logiciel libre *R-Project* (R Core Team, 2012). Les coefficients de corrélation et les valeurs d'EPS ont été calculés sur les données standardisées à l'aide de la fonction `rwi.stats` provenant également du module `dplR`.

### 3.3.4 Fonctions de réponse

Depuis Fritts (1971), les relations entre les séries dendrochronologiques et le climat sont connues sous le terme « fonctions de réponse » (Guiot et Nicault, 2010). La fonction de réponse estime l'influence que différents paramètres climatiques peuvent avoir sur la croissance radiale des arbres. Dans les fonctions de réponse linéaires, les données météorologiques (températures moyennes, précipitations, indices de sécheresse...) sont des régresseurs et les données dendrochronologiques (série de référence maîtresse, séries individuelles...) sont des variables dépendantes. Plus les milieux sont contraignants, plus les relations cernes-climat sont significatives et stables. Un coefficient positif indique une relation directe alors qu'il est négatif dans le cas inverse (Guiot et Nicault, 2010). Dans le but de déterminer quelle est la relation entre la croissance radiale du pin gris et le climat, cette méthode descriptive a été utilisée afin de confronter les indices des séries dendrochronologiques aux données météo. Le calcul des fonctions de réponses a été fait à l'aide du module `bioindic` (Joël Guiot and Yves Gally, CEREGE, CNRS), une composante du logiciel libre *R-Project* (R Core Team, 2012).

Les calculs ont été effectués sur les quatre dendroséries du groupe « étude » et les quatre dendroséries du groupe « témoin ». Par la suite, ils ont été réitérés sur les arbres du groupe « étude » de façon individuelle. La valeur de 1 indique une probabilité de <0,995 et les coefficients sont considérés comme significatifs de [0,98 à 1] (et la négative).

Les paramètres climatiques utilisés pour les calculs des fonctions de réponse sont : les précipitations, les températures mensuelles, les températures minimales mensuelles et la hauteur, la densité et l'équivalent en eau de la neige. Les données de précipitations mensuelles et de températures moyennes mensuelles proviennent de la modélisation faite par le Climatic Research Unit (CRU) (point de grille : -77.25/53.25), celles des températures minimales mensuelles ont été extraites de la base de données d'Environnement Canada, plus précisément de la station météo située à Fort Georges (latitude : 53,83, longitude -79,00, altitude 7 mètres, no. de station 7092480), située à 138 km au nord-ouest du site d'étude L15 et les données « neige » ont été fournies par l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec (Tapsoba *et al.* 2010). Ces variables ont été choisies puisqu'elles représentent différentes facettes et influences du régime hydrologique, en lien direct avec l'hypothèse de départ. Le tableau 3.6 présente un récapitulatif des variables climatiques testées, la période couverte par chaque analyse ainsi que les mois inclus.

**Tableau 3.6: Paramètres, périodes et mois couverts par les calculs de fonctions de réponse.**

| <b>Paramètre climatique</b>              | <b>Période couverte</b> | <b>Mois inclus</b>  |
|--|-------------------------|---------------------|
| <b>Précipitations mensuelles</b>         | 1950-2000               | Octobre à septembre |
| <b>Températures moyennes mensuelles</b>  | 1950-2000               | Octobre à septembre |
| <b>Températures minimales mensuelles</b> | 1917-1968               | Novembre à mai      |
| <b>Précipitations moyennes de neige</b>  | 1961-2005               | Octobre à mai       |
| <b>Hauteur de la neige</b>               | 1961-2005               | Février à avril     |
| <b>Densité de la neige</b>               | 1961-2005               | Février à avril     |
| <b>Équivalent en eau de la neige</b>     | 1961-2005               | Février à avril     |

### **3.3.5 Diagramme de fréquence des cernes incomplets et diagnostiques et des chutes de croissance**

Soixante et un (61) pins gris sur affleurement rocheux et 19 pins gris en bas de pente du groupe « étude » ont été analysés afin de recenser, dans un premier temps, les cernes diagnostiques, et, dans un second temps, les cernes incomplets, et finalement, les chutes de croissance. La nature et la fréquence d'apparition de ces cernes et événements particuliers seront présentées à la section 4.3.3. Ces chronologies ont pour objectif principal de vérifier si les événements sont synchrones ou pas entre les individus afin d'explorer la possibilité de causes d'ordre climatique.

La séquence de cernes diagnostiques a été établie suite à un recensement rigoureux des différents cernes retrouvés chez les pins gris en milieux xériques et mésiques. Les cernes présents chez 20% des individus, dans un milieu ou un autre, ont été retenus pour faire partie de la chronologie.

La séquence de cernes incomplets a été établie de façon similaire : chaque cerne incomplet repéré a été noté, suite à quoi une analyse de fréquence a permis de déterminer quelles années se retrouvaient à une fréquence de 20% et ces années ont été incorporées à la chronologie.

La séquence de cernes diagnostiques a non seulement servi à dater les échantillons avec une bonne certitude, mais elle a aussi permis de déterminer les années où se sont produites des chutes de croissance importantes : les débuts des périodes de réduction de croissance ont été datées à l'aide des cernes diagnostiques, et le décompte des cernes des

dernières années de vie (quelques échantillons présentent une reprise de croissance dans les années 1990) ont permis de cibler et dater les zones problématiques.

Certains échantillons n'ont pas été utilisés pour l'analyse. Ils ne présentaient pas suffisamment de cernes diagnostiques permettant de valider leur année d'établissement et les statistiques obtenues lors d'essais d'interdatation dans COFECHA n'étaient pas concluantes. Parmi eux, certains comportent des cernes absents qui, selon COFECHA sont à un maximum de 17, et qui sont très probablement localisés dans les périodes de chute de croissance.

## **4. RÉSULTATS**

### **4.1 Croissance comparée du pin gris et de l'épinette noire selon le drainage**

#### **4.1.1 Caractérisation de la croissance**

##### **Croissance cumulée**

La figure 4.1 présente les courbes d'accroissements cumulés réalisées à partir des chronologies d'épaisseurs de cernes des arbres échantillonnés dans les quatre situations du site L15 : épinette sur affleurement rocheux (L15-EX), épinette en bas de pente (L15-EM), pin gris sur affleurement rocheux (L15-PX), pin gris en bas de pente (L15-PM). Les cumuls des largeurs de cernes bruts présentés en « a » permettent de constater que l'épinette noire a une meilleure croissance en milieu mésique qu'en milieu xérique. Les intervalles de confiance ne se chevauchent pas ou peu, ce qui signifie que la croissance est significativement différente. La comparaison de la croissance du pin gris en milieux sec et humide présentée en « b » montre que le pin gris a aussi une meilleure croissance en milieu humide, l'écart est d'ailleurs significativement plus marqué lors des 50-60 premières années de vie. Par la suite, les populations de pin gris des deux milieux tendent vers une croissance de plus en plus similaire en ce qui a trait à la production totale de bois. Lorsque la croissance des deux espèces est comparée pour un même milieu, le pin a une meilleure croissance que l'épinette. En milieu xérique (c), cette supériorité est marquée jusqu'à l'âge cambial de 70 ans alors qu'en milieu mésique (d) c'est jusqu'à environ 65 ans, ensuite la croissance des arbres des deux espèces n'est pas significativement différente. En somme, le pin gris comme l'épinette noire ont une meilleure croissance en milieu mésique qu'en milieu xérique, et, des deux espèces, le pin gris a une meilleure croissance quel que soit le milieu considéré.

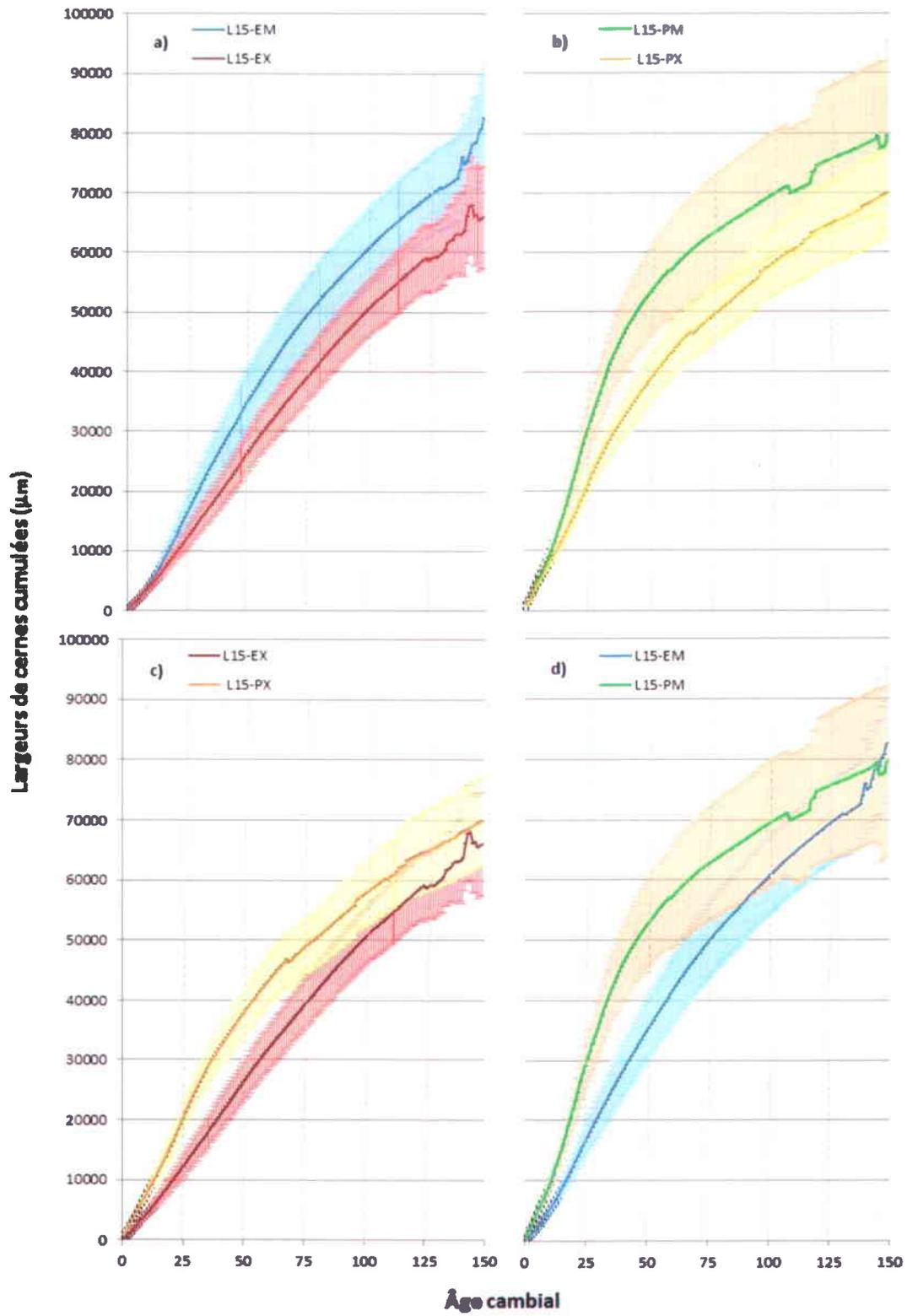
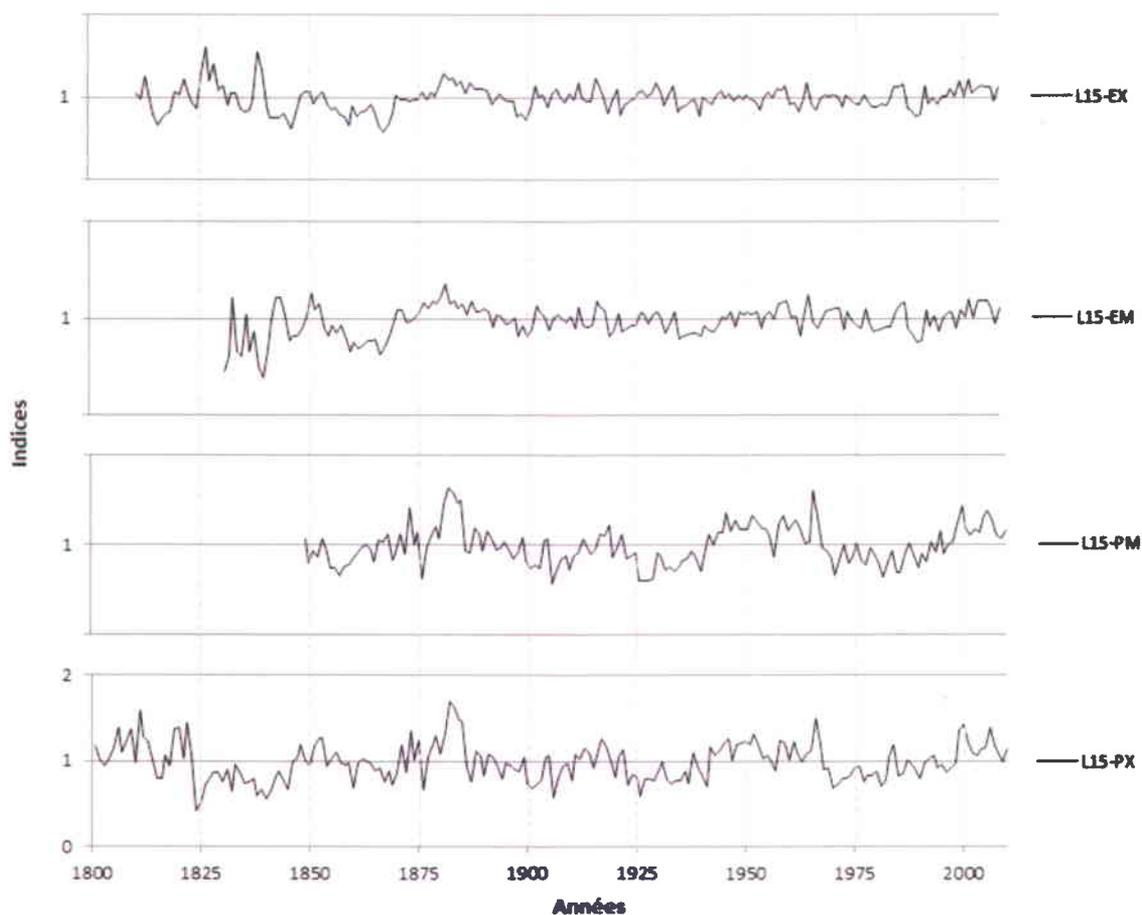


Figure 4.1: Courbes d'accroissements cumulés pour les dendroséries de pin gris et d'épinette noire (groupe « étude »).

#### **4.1.2 Comparaison des patrons de croissance standardisés inter-arbres et inter-milieus**

Les séries de pin gris ont été standardisées à l'aide du modèle exponentiel négatif avec une alternance de spline lorsque les indices obtenus étaient supérieurs à trois. Dans le cas des épinettes noires, l'exponentielle négative a été utilisée pour tous les individus. La figure 4.2 présente les patrons de croissance standardisés pour les quatre séries du groupe « étude ».

La figure 4.2 permet visualiser la plus grande amplitude des variations de croissance présentes chez le pin gris et ce, indifféremment des milieux. Cette amplitude plus marquée est chiffrée par le biais de la sensibilité moyenne, présentée à la section 4.1.3 (statistiques descriptives).

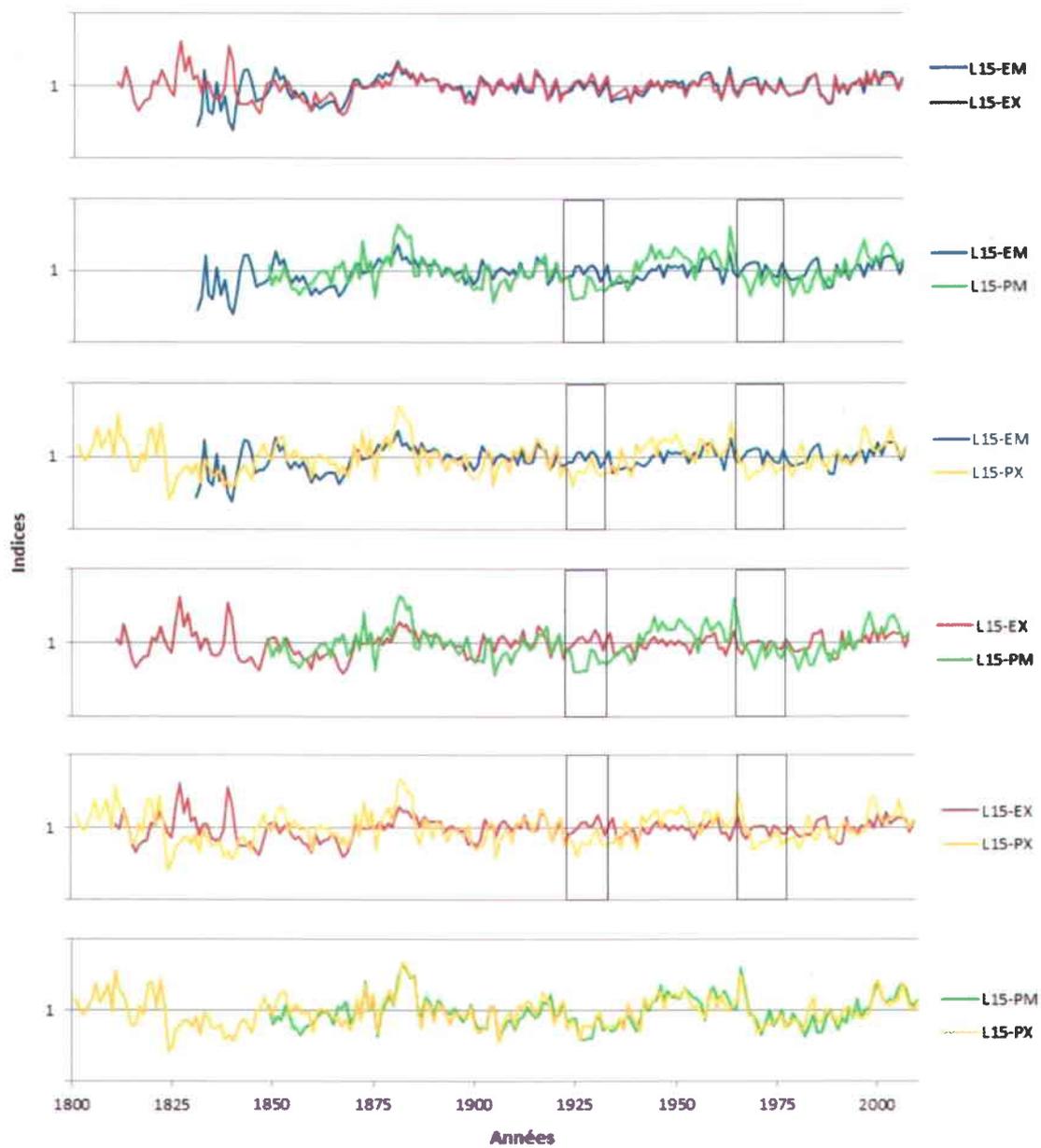


**Figure 4.2: Patrons de croissance standardisés de pins gris et d'épinettes noires (groupe « étude »).**

La figure 4.3 illustre les comparaisons de patrons de croissance des dendroséries du groupe « étude » (L15). Les séries d'épinette noire et de pin gris en milieu xérique et mésique y sont comparées les unes avec les autres. Il en ressort que pour une même espèce, le milieu n'a pas d'influence significative sur le patron de croissance (L15-EM et L15-EX, L15-PM et L15-PX). Les différences se trouvent lors des comparaisons d'espèces seulement, indépendamment des milieux.

La figure 4.3 permet également de remarquer les années de plus faible croissance chez le pin qui correspondent aux cernes diagnostiques recensés, tel que 1876 et 1906 (cernes étroits) (voir section 4.3.3). Suite à ces années difficiles, la croissance reprend normalement, c'est-à-dire que l'année suivante présente une croissance dans la moyenne.

Dans l'ensemble, les deux espèces ont une croissance plutôt synchrone, mises à part certaines phases où le pin gris a une tendance de croissance négative, alors que l'épinette noire ne présente pas de variations majeures. Ces périodes correspondent en partie aux chutes de croissance présentées à la section 4.3.3, soit entre 1923-1941 et 1968-1998 (encadrées).



**Figure 4.3: Comparaisons inter-espèces et inter-milieus des dendroséries (groupe « étude »)**  
 (Les encadrés attirent l'attention sur les périodes où le pin fait une incursion dans des phases de croissance plus faibles alors que l'épinette poursuit une croissance normale).

### 4.1.3 Statistiques descriptives

#### Sensibilité des séries de largeurs de cernes

Selon Fritts (1976), plus la croissance d'un arbre est limitée par différents facteurs environnementaux, plus il devrait montrer de variations de largeurs de cernes. Il a d'ailleurs proposé un indice permettant d'exprimer la mesure de cette variabilité intra-annuelle de la croissance radiale : il s'agit de la sensibilité moyenne des dendroséries. L'indice varie de 0 à 1. Selon Schweingruber (1988), l'indice peut varier de 0,65 (pour des arbres très sensibles à la sécheresse, par exemple) à 0,15 (pour des arbres peu sensibles). Les dendroséries dont la sensibilité oscillent autour des  $>0,2$  sont dites « sensibles », alors que celles dont la sensibilité se trouve sous le seuil des  $<0,15$  sont dites « complacentes ».

Le pin présente des variations de croissance dont l'amplitude est supérieure à celles de l'épinette, ce qui est confirmé par les statistiques des séries dendrochronologiques (Tableau 4.1) : le pin gris a une sensibilité moyenne de 0,24 contre 0,16 pour l'épinette noire. Les séries standardisées (Figure 4.2) illustrent les variations de croissance de plus grande amplitude chez le pin gris en dépit d'environnements similaires. Pour les deux espèces, la sensibilité est plutôt égale en milieu xérique et en milieu mésique (0,16 et 0,15 pour l'épinette noire et 0,24 et 0,23 pour le pin gris).

## Auto régression des largeurs de cernes

L'auto régression d'ordre un indique l'influence statistique d'une année de croissance sur la suivante. Le principe physiologique est fondé sur le fait qu'un arbre dispose d'une réserve de photosynthats correspondant à l'ambiance d'une année, qui peuvent être mis à sa disposition pour le démarrage de la croissance de la prochaine année. À chaque année de bonne croissance correspondrait une croissance avantaagée l'année suivante. Or, l'autocorrélation est une mesure de cette dépendance d'une année sur la précédente. Plus un coefficient est élevé, plus la variance présente à l'intérieur de la série peut être expliquée par le passé même de l'individu.

Les arbres des milieux mésiques sont ceux dont la croissance est la plus dépendante des années précédentes avec des coefficients d'auto régression de 0,86 pour l'épinette noire et de 0,90 pour le pin gris, alors que les séries provenant des milieux xériques affichent toutes deux des coefficients de 0,83 (Tableau 4.1).

Tableau 4.1: Statistiques des séries brutes (groupe « étude »).

| Site   | Type de milieu | N  | Sensibilité moyenne | AR (1) |
|--------|----------------|----|---------------------|--------|
| L15-EM | Mésique        | 36 | 0,15                | 0,86   |
| L15-EX | Xérique        | 30 | 0,16                | 0,83   |
| L15-PM | Mésique        | 16 | 0,23                | 0,90   |
| L15-PX | Xérique        | 36 | 0,24                | 0,83   |

## **Corrélation inter-arbres à l'intérieur des séries (R et EPS)**

Le coefficient de corrélation de Pearson ( $r$ ) représente la corrélation moyenne des arbres les uns avec les autres pour une série donnée. Un coefficient de  $\pm 1$  représente une relation linéaire forte alors que plus la valeur de  $r$  se rapproche de 0 plus la relation linéaire est faible. Une plus faible corrélation signifie une croissance inter-arbres plus variée, alors qu'une forte corrélation suggère une croissance plutôt homogène pour tous les arbres d'un même site.

Les coefficients de corrélation de Pearson affichent un éventail allant de 0,14 à 0,44, ce qui suggère une relation linéaire plutôt variable en fonction des individus et des milieux. Les épinettes noires en milieu xérique sont celles qui affichent le  $r$  le plus bas avec un coefficient de 0,14, alors que les pins gris en milieu mésique ont le coefficient le plus élevé de 0,44 (Tableau 4.2).

Les valeurs d'EPS (Expressed Population Signal) expriment la représentativité statistique d'une population à l'intérieur d'une série, le signal commun. Il varie de zéro à un, un étant l'expression parfaite de la population, avec un seuil de signification fixé à 0,85. Les résultats obtenus pour les dendroséries du groupe « étude » varient de 0,86 à 0,95 (Tableau 4.2). Ces valeurs indiquent que les individus échantillonnés sont représentatifs des populations desquelles ils proviennent. Le plus faible EPS se trouve chez l'épinette noire en milieu xérique, alors que la valeur la plus élevée se trouve chez le pin gris en milieu xérique.

**Tableau 4.2: Statistiques des séries standardisées (groupe « étude »).**

| <b>Site</b>   | <b>Milieu</b> | <b>n</b> | <b>r</b> | <b>EPS</b> |
|---------------|---------------|----------|----------|------------|
| <b>L15-EM</b> | Mésique       | 36       | 0,21     | 0,89       |
| <b>L15-EX</b> | Xérique       | 30       | 0,14     | 0,86       |
| <b>L15-PM</b> | Mésique       | 16       | 0,44     | 0,93       |
| <b>L15-PX</b> | Xérique       | 36       | 0,34     | 0,95       |

## **4.2 Croissance comparée du pin gris selon le drainage**

### **4.2.1 Caractérisation de la croissance**

#### **Croissance cumulée**

La figure 4.4 présente les courbes d'accroissements cumulés réalisés à partir de chronologies d'épaisseurs de cernes provenant de pins gris issus de différents milieux (il est à noter que les diminutions de croissance présentes sur la figure 4.4, encoche présente sur la courbe verte de l'âge cambial 108 à 119, sont des artefacts méthodologiques liés à la variation du nombre d'arbres présents, à certains arbres plus jeunes ou à des portions d'arbres non mesurés qui sont inclus dans la moyenne). Les quatre premières dendroséries, LG4, NORD, UK et VPG proviennent du groupe « témoin » et ont été construites à partir d'arbres ayant poussé en milieu mésique. Les dendroséries L15-PM et L15-PX proviennent quant à elles du groupe « étude ». L15-PM correspond aux pins gris prélevés en milieu mésique et L15-PX à ceux du milieu xérique (affleurements rocheux). La série LG4, bien que plus courte que les autres, est constituée d'un nombre suffisant d'arbres. En revanche les séries UK et VPG, bien que plus longues, ont dû être écourtées afin de conserver pour chaque année un nombre d'arbres suffisant.

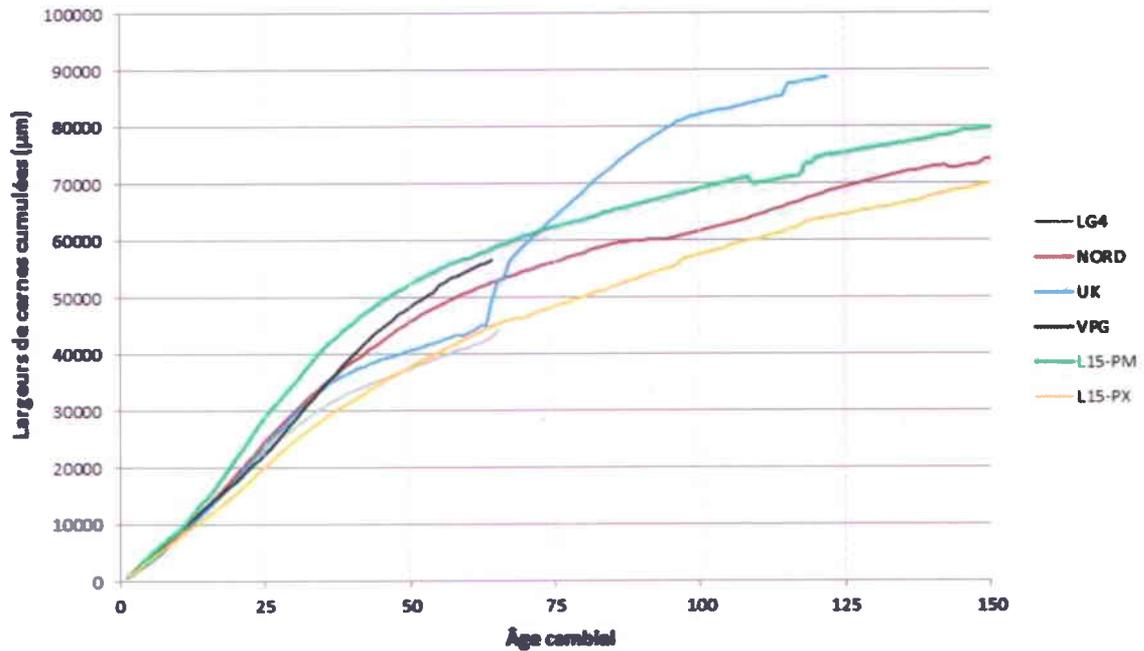


Figure 4.4: Courbes d'accroissements cumulés pour les six dendroséries de pin gris (groupes "étude" et "témoin").

Les accroissements cumulés des séries NORD, L15-PM et L15-PX suivent une même tendance très similaire tout au long des années. Les taux de croissance des pins gris du site NORD sont plus faibles que ceux des pins du site mésique L15-PM mais plus élevés que ceux du site xérique L15-PX. La courbe de LG4, bien que provenant d'un milieu mésique, montre un taux de croissance très proche, voire inférieur à la série du milieu xérique (L15-PX). Bien que le site ne soit pas à proprement parler situé en limite d'aire de répartition (autour du 55° parallèle), la situation plus continentale et plus en altitude pourrait être responsable de la croissance plus faible des pins échantillonnés dans le secteur du réservoir LG4. La série UK possède un patron de croissance atypique des pins gris qui se remarque sur la courbe d'accroissement cumulé. La population du site étant équienne, il est fort probable que l'augmentation de croissance observée à partir de l'année 65 soit le résultat d'un incendie ayant affecté le site. Avant cet événement, la courbe du site UK montrait une croissance similaire à celle du site LG4 qui montre une diminution des taux de croissance plus précoce que pour les autres sites. De façon

générale, il apparaît clairement qu'à l'exception de la croissance du site LG4, les milieux xériques conditionnent une croissance plus faible que les milieux mésiques.

#### **4.2.2 Comparaison des patrons de croissance standardisés inter-arbres et inter-milieux et variabilité intra-site**

##### **Comparaison des dendroséries standardisées**

L'ensemble des dendroséries produites ont un patron de croissance similaire et typique des pins (Fritts, 1976). Tel que mentionné précédemment, la principale méthode utilisée est celle du modèle exponentiel négatif, qui correspond bien aux individus ayant une croissance rapide en phase juvénile suivie d'une diminution progressive des largeurs de cernes (Figure 4.7). Ce modèle permet de conserver les signaux de basse fréquence, tout en éliminant l'effet de l'âge sur la croissance. En effet, l'arbre construit son modèle architectural en ajoutant des enveloppes de xylème annuellement tout en augmentant sa masse foliaire (augmentation de sa capacité de photosynthèse). Mais progressivement, l'ajout de masse foliaire s'amenuise, la masse totale se stabilise et le bois ajouté est réparti sur une surface croissante, ce qui donne des cernes de plus en plus minces, d'où l'effet de l'âge communément connu en dendrochronologie. De plus, l'exponentielle négative offre de bonnes corrélations avec les séries de données brutes, tel qu'illustré à la figure 4.5. Cette figure montre, pour chaque dendrosérie de pin gris, la proportion d'arbres contenus dans chacune des classes de coefficients de corrélation avec le modèle d'ajustement. Certaines séries comportent une forte proportion d'arbres présentant de faibles coefficients de corrélation avec le modèle d'ajustement, comme la série VPG.

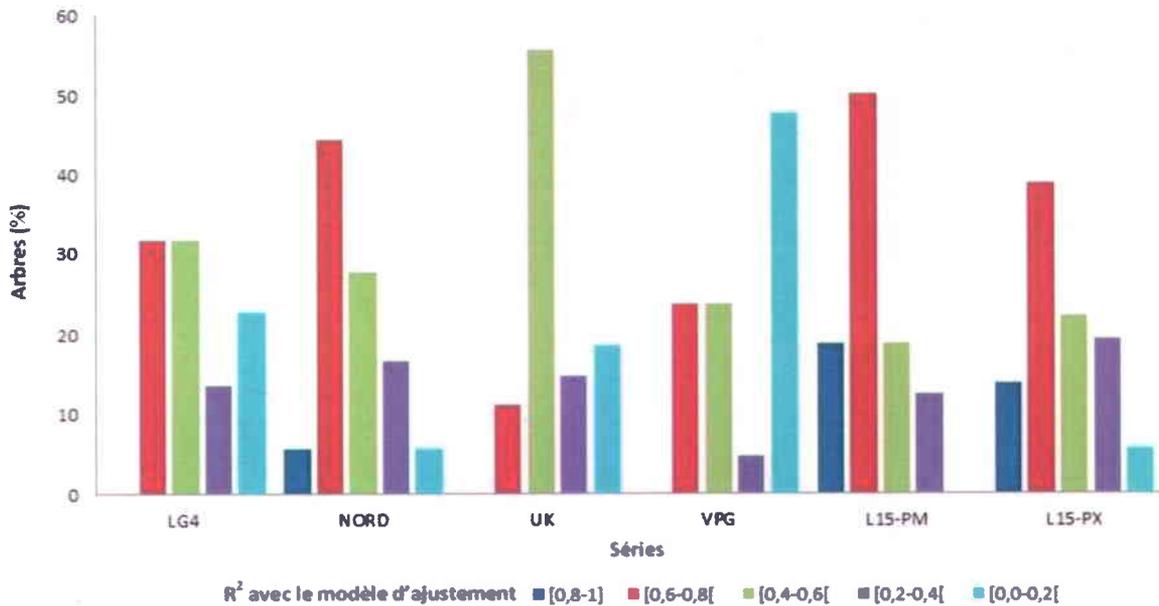


Figure 4.5: Les différentes forces de corrélations entre les séries de largeurs de cernes brutes et le modèle d’ajustement d’exponentielle négative (goupes « étude » et « témoin »).

Dans les cas où les individus n’ont pas une bonne corrélation avec le modèle d’ajustement, il apparaît que le patron de croissance suit d’autres modèles. Malgré une corrélation plutôt faible, comme dans le cas de l’échantillon VPG 20 ( $R^2$  de 0,04), l’exponentielle négative a tout de même été préférée à d’autres méthodes, notamment à la spline cubique, puisqu’elle permet de conserver davantage des variations de cette croissance particulière (Figure 4.6).

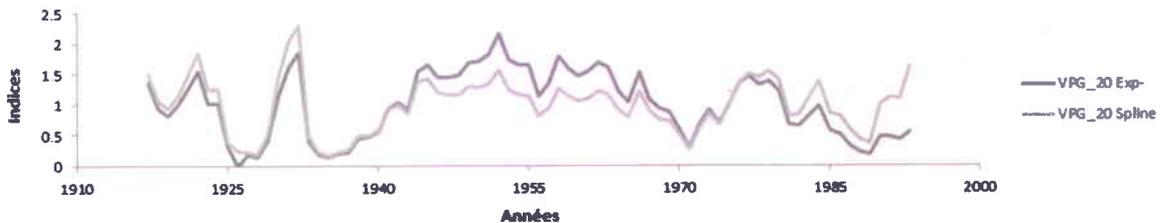
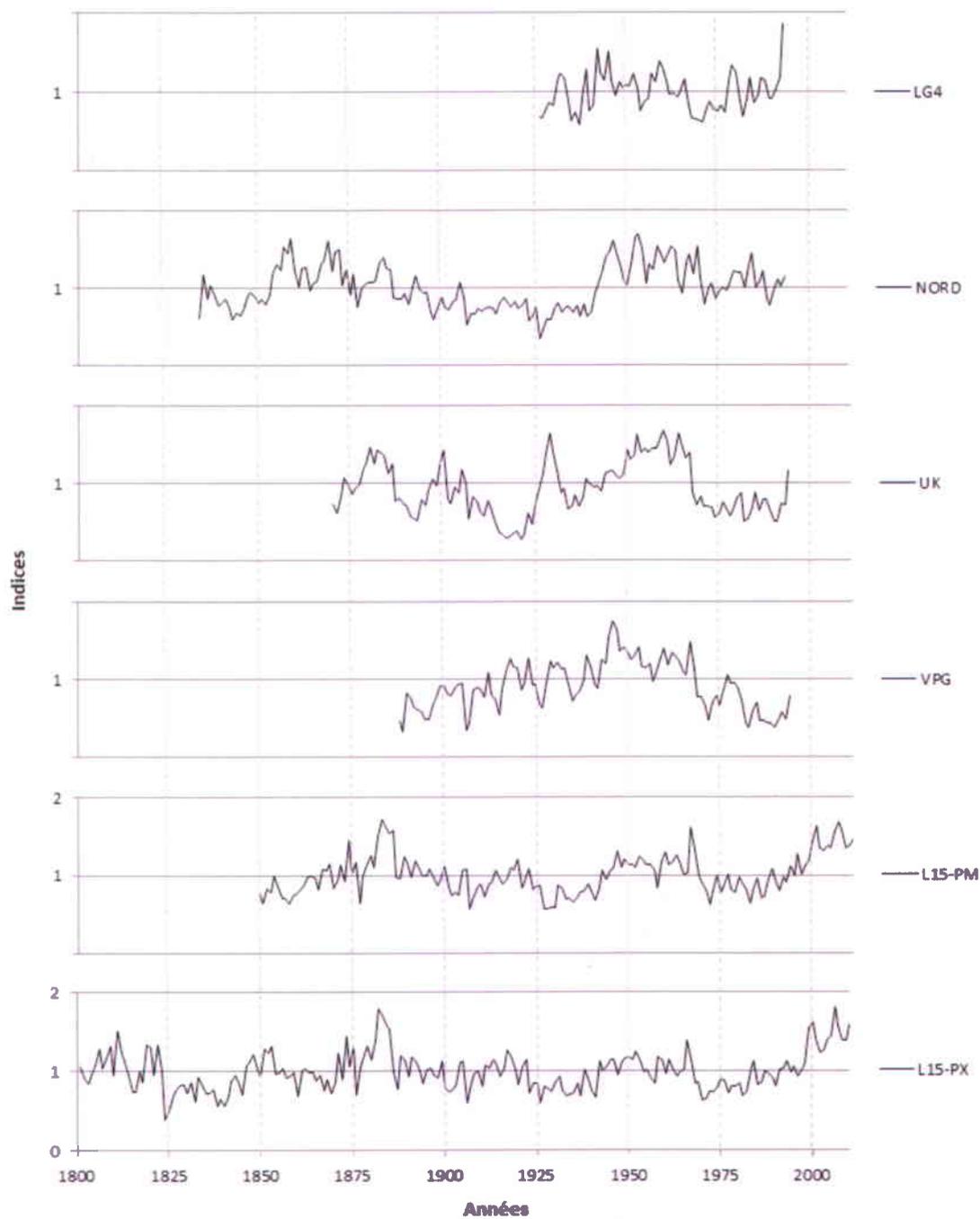


Figure 4.6: Comparaison entre l’exponentielle négative et la spline dans le cas d’un individu ayant un faible coefficient de corrélation avec l’exponentielle négative.

Le choix du modèle de croissance pour la standardisation peut s'avérer crucial en dendrochronologie, mais il appert qu'il doit faire l'objet d'un compromis arbitraire entre les fréquences résiduelles à valoriser pour les fins désignées de l'étude. Dans un souci d'uniformité, la spline a alors été utilisée seulement lorsque les indices obtenus avec l'exponentielle négative étaient trop grands, voire démesurés ( $>3$ ), ce qui a été le cas avec quelques individus du groupe « étude ». Les six séries standardisées sont représentées à la figure 4.7.



**Figure 4.7: Courbes de croissance standardisées des différentes dendroséries de pins gris (groupes « étude » et « témoin »).**

### **Variabilité intra-site (groupe « étude »)**

Puisque les arbres du groupe « étude » ont été échantillonnés sur différentes crêtes rocheuses, quoique similaires, il a semblé intéressant de quantifier la variabilité de croissance à l'intérieur même du site L15. Les arbres ont été regroupés et analysés par crête rocheuse et par milieu. Puisqu'il n'y a pas d'individu en milieu mésique sur la crête 69, la comparaison inclut six crêtes rocheuses sur lesquelles le pin gris a été échantillonné, soit 22, 44, 58, 101, 200 et 225.

Les coefficients de corrélation ( $r$ ) (Tableau 4.3) sont plus élevés en milieu mésique qu'en milieu xérique (lorsque la crête comporte assez d'individus pour qu'il soit possible d'effectuer le calcul), ce qui peut indiquer une croissance plus uniforme. Ceci est appuyé par une plus grande sensibilité (variabilité) en milieu xérique pour quatre crêtes sur six, soit les crêtes 44, 58, 200 et 225 (et égale entre les deux milieux pour la crête 101) et de meilleurs coefficients d'auto régression pour les milieux mésiques. Ces résultats peuvent indiquer non seulement une croissance plus homogène en milieu mésique, mais aussi, à l'échelle des individus au sein de ce milieu. La plus grande variabilité des milieux xériques s'exprime à l'intérieur d'une croissance plus faible pour quatre crêtes sur six, soit les crêtes 22, 58, 200 et 225, ce qui est probablement une influence limitative du milieu de croissance. L'écart-type en milieu xérique est donc plus faible qu'en milieu mésique, puisque les cernes sont plus étroits et la croissance est plus faible. Les patrons de croissance (standardisés) provenant des différentes crêtes et différents milieux sont présentés à la figure 4.8.

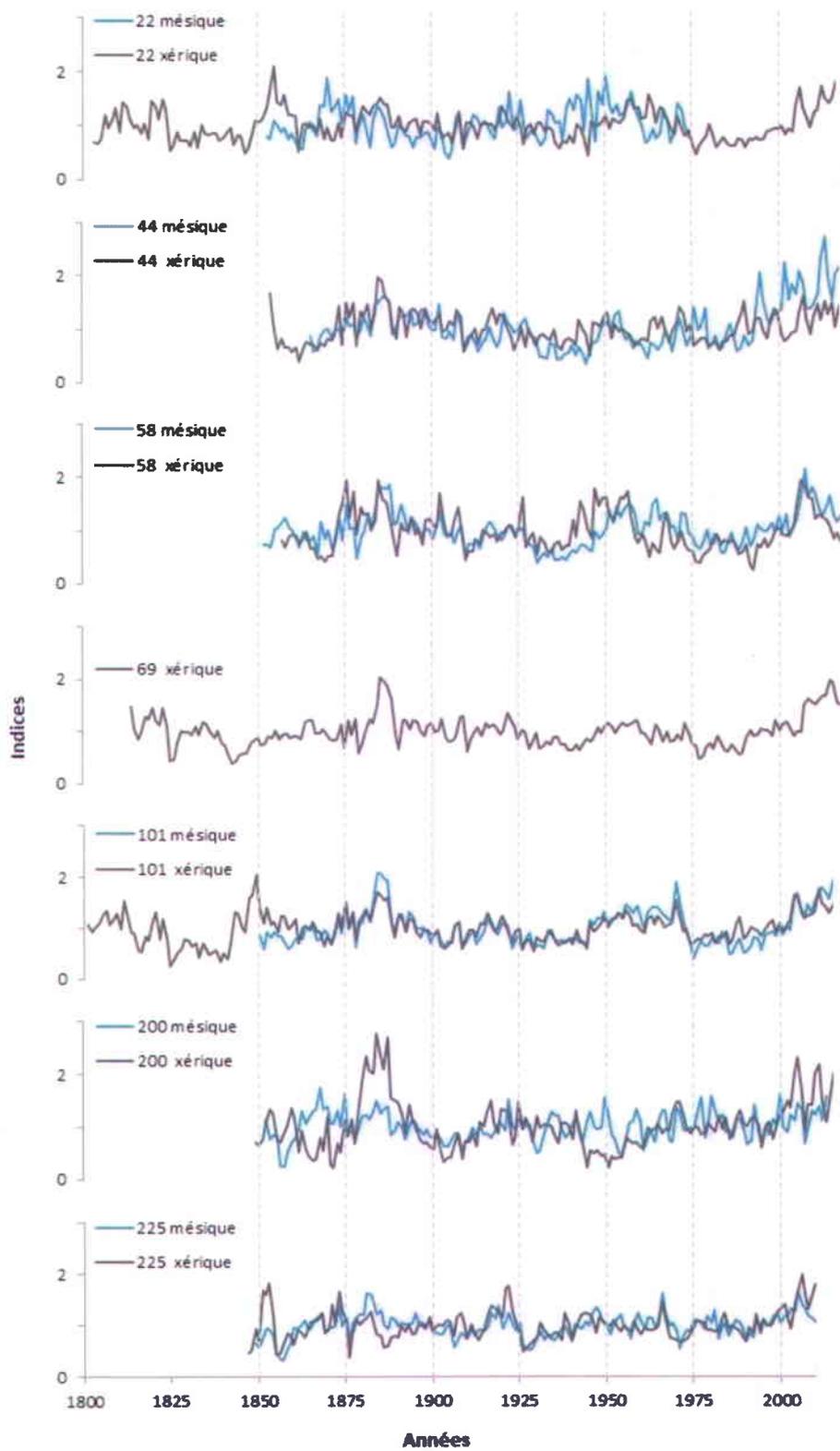
**Tableau 4.3: Statistiques associées aux différentes crêtes échantillonnées (groupe « étude »).**

| Crête<br>Rocheuse | Type de<br>milieu | n  | r    | Sensibilité<br>moyenne | Croissance<br>moyenne<br>( $\mu\text{m}$ ) | Écart-type<br>( $\mu\text{m}$ ) | Auto-<br>Régression<br>(1) |
|-------------------|-------------------|----|------|------------------------|--|---------------------------------|----------------------------|
| 22                | Xérique           | 4  | 0,52 | 0,22                   | 495  | 313                             | 0,85                       |
| 22                | Mésique           | 1  | -    | 0,26                   | 529  | 548                             | 0,91                       |
| 44                | Xérique           | 3  | 0,75 | 0,25                   | 474  | 309                             | 0,81                       |
| 44                | Mésique           | 1  | -    | 0,22                   | 429  | 390                             | 0,94                       |
| 58                | Xérique           | 2  | 0,49 | 0,26                   | 330  | 207                             | 0,79                       |
| 58                | Mésique           | 3  | 0,85 | 0,24                   | 414  | 369                             | 0,89                       |
| 69                | Xérique           | 8  | 0,73 | 0,24                   | 401  | 284                             | 0,85                       |
| 69                | Mésique           | 0  | -    | -                      | -  | -                               | -                          |
| 101               | Xérique           | 15 | 0,58 | 0,24                   | 526  | 358                             | 0,84                       |
| 101               | Mésique           | 4  | 0,81 | 0,24                   | 460  | 371                             | 0,88                       |
| 200               | Xérique           | 1  | -    | 0,27                   | 441  | 393                             | 0,88                       |
| 200               | Mésique           | 1  | -    | 0,22                   | 742  | 665                             | 0,92                       |
| 225               | Xérique           | 4  | 0,22 | 0,24                   | 484  | 330                             | 0,78                       |
| 225               | Mésique           | 5  | 0,43 | 0,20                   | 794  | 585                             | 0,91                       |

Les arbres ont ensuite été regroupés par milieu seulement afin de vérifier si la corrélation entre les individus variait de façon significative d'un milieu à l'autre. Les données brutes présentent un coefficient de corrélation plus élevé en milieu mésique (Tableau 4.4), ce qui correspond aux résultats obtenus lors de l'analyse intra-site.

**Tableau 4.4: Coefficients de corrélation par milieu pour le groupe « étude » (données brutes et standardisées).**

| <b>Milieu</b>            | <b>R (données brutes)</b> | <b>R (données standardisées)</b> |
|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| <b>Xérique</b>           | 0,80                      | 0,52                             |
| <b>Mésique</b>           | 0,88                      | 0,45                             |
| <b>Xérique + mésique</b> | 0,82                      | 0,47                             |



**Figure 4.8: Comparaison des patrons de croissance (standardisés) des pins gris provenant des différentes crêtes et milieux (groupe « étude »).**

### 4.2.3 Statistiques descriptives

#### Sensibilité des séries de largeurs de cernes

Les cinq sites en milieu mésique (provenant des groupes « étude » et « témoin ») et la série en milieu xérique (groupe « étude ») présentent une sensibilité moyenne variant de 0,22 à 0,29; ce sont donc des séries sensibles (Tableau 4.5). Contre toute attente, le pin gris en milieu xérique a une sensibilité similaire à celle des arbres du milieu mésique (0,24, [0,22 à 0,29]), ce qui laisse croire qu'il est possible, malgré les facteurs limitants associés à un milieu très sec, que la croissance ne soit pas plus variable qu'en milieu mésique. Le principe de Fritts (1976) énoncé plus haut pourrait ne pas s'appliquer au drainage comme facteur limitant la croissance du pin gris.

De tels résultats démontrent que la sensibilité moyenne exprimée par un individu n'est pas reliée à sa productivité moyenne. Une analyse de corrélation entre les deux variables a été effectuée et il n'y a pas de cause à effet entre le rythme de croissance et la sensibilité. Donc, de façon générale, il semble que le stress hydrique subi par les individus en milieu xérique ne soit pas un facteur conduisant à une variabilité inter-annuelle plus grande qu'en milieu mésique.

Les dendroséries UK et VPG ont toutes deux des patrons de croissance atypiques de pins (figure 4.7) et possèdent l'indice de sensibilité moyenne le plus bas (0,22 pour UK) et le plus élevé (0,29 pour VPG). Les autres dendroséries, avec des patrons de croissance réguliers (exponentielle négative), se situent entre les deux extrémités (0,22 – 0,29), ce qui laisse croire que le patron de croissance ne peut être considéré comme un indicateur de la sensibilité moyenne d'un individu.

## Auto régression des largeurs de cernes (AR)

La série présentant le plus haut coefficient d'auto régression est L15-PM (0,90) et le plus faible se trouve dans la série LG4 (0,76), toutes deux provenant de milieux mésiques (Tableau 4.5). La série en milieu xérique, L15-PX, se situe à mi-chemin entre les deux extrêmes, soit à 0,83. Ces résultats tendent à démontrer que non seulement le drainage et le patron de croissance ne semblent pas avoir d'incidence sur le coefficient d'autorégression d'ordre un, mais que ce dernier semble davantage influencé par la croissance en surface de l'arbre. En effet, en comparant les coefficients présentés au tableau 4.5 aux courbes d'accroissements cumulés de la figure 4.4, il apparaît que plus les arbres ont une bonne croissance globale, plus cette dernière est influencée par l'année précédente.

**Tableau 4.5: Statistiques des séries brutes de largeurs de cernes des arbres selon les peuplements échantillonnés. AR (1) : Autocorrélation d'ordre 1 (groupes « étude » et « témoin »).**

| Site   | Type de milieu | n  | Sensibilité moyenne | AR (1) |
|--------|----------------|----|---------------------|--------|
| LG4    | Mésique        | 22 | 0,28                | 0,76   |
| NORD   | Mésique        | 36 | 0,24                | 0,89   |
| UK     | Mésique        | 27 | 0,22                | 0,87   |
| VPG    | Mésique        | 21 | 0,29                | 0,83   |
| L15-PM | Mésique        | 16 | 0,23                | 0,90   |
| L15-PX | Xérique        | 35 | 0,24                | 0,83   |

## Corrélation inter-arbres à l'intérieur des sites (R et EPS)

Les arbres possédant les plus hauts coefficients de corrélation, et donc les plus similaires entre eux, sont les pins gris en milieu mésique de la série UK (0,57). Les plus faibles coefficients, par conséquent les plus différents entre eux, sont ceux issus de l'échantillonnage du site LG4 et de l'île Venteuse (0,32) (Tableau 4.6).

Tel que mentionné précédemment, le seuil fixé à 0,85 pour les valeurs d'EPS permet de croire que l'échantillonnage est représentatif de la population. Les séries constituent donc de bonnes représentations de leurs milieux avec des valeurs d'EPS allant de 0,91 (LG4 et VPG) à 0,97 (UK) (Tableau 4.6).

Tableau 4.6: Statistiques des séries standardisées (groupes « étude » et « témoin »).

| Site   | Type de milieu | n  | r    | EPS  |
|--------|----------------|----|------|------|
| LG4    | Mésique        | 22 | 0,32 | 0,91 |
| NORD   | Mésique        | 36 | 0,38 | 0,96 |
| UK     | Mésique        | 27 | 0,57 | 0,97 |
| VPG    | Mésique        | 21 | 0,32 | 0,91 |
| L15-PM | Mésique        | 16 | 0,44 | 0,93 |
| L15-PX | Xérique        | 35 | 0,34 | 0,95 |

## 4.3 Relations avec le climat

### 4.3.1 Fonctions de réponses groupe « étude »

Les individus ont été traités selon les quatre groupes de l'échantillonnage, soit épinette noire en bas de pente (L15-EM), épinette noire en affleurement rocheux (L15-EX), pin gris en bas de pente (L15-PM) et pin gris en affleurement rocheux (L15-PX). Les paramètres climatiques testés sur les deux espèces dans les deux milieux sont : les précipitations mensuelles, les températures mensuelles, les températures minimales mensuelles, les précipitations moyennes, la hauteur, la densité et l'équivalent en eau de la neige. Dans un premier temps, les variables ont été testées une à une sur les séries, et dans un second temps, les meilleures réponses ont été regroupées afin de tenter de renforcer le signal. Ensuite, pour une analyse plus fine avec les paramètres climatiques offrant les meilleures réponses, les régresseurs ont été testés sur chaque individu composant les quatre séries.

La fiabilité globale de la fonction de réponse est évaluée sur la base du coefficient de détermination moyen ( $R^2$ ) calculé sur les années de calibration au carré. Il exprime, en outre, le pourcentage des variations de croissance expliqué par les paramètres climatiques. RMSE et  $R^2$  sont fortement liés, ainsi dans la suite du texte l'attention sera portée essentiellement sur le  $R^2$ . Le poids de chaque variable climatique dans la régression est évalué par le niveau de confiance du coefficient de régression, c'est-à-dire la probabilité de se tromper en acceptant l'hypothèse de nullité de la relation. La valeur 1 indique une probabilité  $>0,995$ . Le signe de ce coefficient de régression partielle précise également la nature de la relation (directe ou inverse) entre la croissance et la variable climatique considérée. Le seuil de signification fixé pour l'analyse est de [0,98 à 1] (et la négative); ces coefficients révèlent une influence significative du paramètre climatique testé sur la croissance des arbres. Les valeurs significatives positives sont surlignées en

vert, les valeurs significatives négatives en rouge, et celles près du seuil, soit de [0,95 à 0,98[, en gris.

## a) Températures

### Températures mensuelles

Les arbres présentent une sensibilité aux températures mensuelles avec des  $R^2$  allant de 0,27 pour l'épinette noire en bas de pente à 0,32 pour le pin gris en bas de pente (Tableau 4.7). Les fonctions de réponses des largeurs de cernes aux températures mensuelles indiquent un effet positif significatif de la température de décembre pour toutes les dendroséries à l'exception de celle de l'épinette noire en bas de pente qui indique un effet positif des températures du mois d'avril. Les deux séries d'épinettes noires sont sensibles aux températures du mois d'avril tandis que les pins gris ne semblent pas être influencés par les températures de ce mois.

Tableau 4.7: Réponses aux températures moyennes mensuelles pour la période 1950-2000 (CRU) (Groupe « étude ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives).

|                  | L15-EM | L15-EX | L15-PM | L15-PX |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| <b>R2</b>        | 0,27   | 0,31   | 0,32   | 0,31   |
| <b>RMSE</b>      | 0,09   | 0,09   | 0,18   | 0,17   |
| <b>Octobre</b>   | -0,62  | -0,78  | -0,71  | -0,7   |
| <b>Novembre</b>  | -0,83  | -0,95  | +0,54  | -0,54  |
| <b>Décembre</b>  | +0,92  | +0,99  | +0,99  | +0,98  |
| <b>Janvier</b>   | +0,87  | +0,89  | +0,94  | +0,78  |
| <b>Février</b>   | -0,6   | -0,63  | -0,59  | +0,68  |
| <b>Mars</b>      | +0,56  | +0,82  | +0,78  | +0,77  |
| <b>Avril</b>     | +0,99  | +0,98  | +0,91  | +0,92  |
| <b>Mai</b>       | +0,51  | +0,52  | -0,58  | +0,61  |
| <b>Juin</b>      | -0,9   | -0,82  | -0,8   | -0,59  |
| <b>Juillet</b>   | -0,55  | +0,71  | +0,53  | -0,6   |
| <b>Août</b>      | -0,91  | -0,75  | +0,59  | -0,6   |
| <b>Septembre</b> | +0,83  | +0,78  | +0,91  | +0,84  |

Calculated on 51 observations Regression Coefficients with 95% confidence interval and prob-value

## Températures minimales mensuelles

Afin de vérifier si les arbres sont plus sensibles aux températures minimales qu'aux températures moyennes, les données de la station météo d'Environnement Canada située à Fort Georges (latitude : 53,83, longitude : -79,00, altitude : 7 mètres, no. de station : 7092480) ont été utilisées. Malgré son emplacement maritime, cette station a été choisie parmi les autres potentielles parce qu'elle représente le meilleur compromis entre longueur de période couverte et années manquantes.

Avec un  $R^2$  minimum de 0,18 pour l'épinette noire sur affleurement et un  $R^2$  maximal de 0,30 pour le pin gris en bas de pente (Tableau 4.8), les coefficients calculés entre les températures minimales et les largeurs de cernes ne sont pas significatifs. L'épinette noire en bas de pente indique une faible sensibilité positive aux températures de décembre, alors que le pin gris, pour les deux milieux, indique une sensibilité similaire pour le mois d'avril.

**Tableau 4.8: Réponses aux températures minimum pour la période 1917-1968 (station Fort-Georges) (Groupe « étude ») (Surlignage gris= valeurs près du seuil de signification).**

|                 | L15-EM | L15-EX | L15-PM | L15-PX |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| <b>R2</b>       | 0,24   | 0,18   | 0,30   | 0,27   |
| <b>RMSE</b>     | 0,11   | 0,09   | 0,20   | 0,16   |
| <b>Novembre</b> | -0,85  | +0,6   | +0,68  | +0,79  |
| <b>Décembre</b> | +0,96  | +0,91  | +0,58  | +0,52  |
| <b>Janvier</b>  | -0,67  | -0,58  | +0,85  | +0,65  |
| <b>Février</b>  | +0,75  | -0,69  | +0,82  | +0,65  |
| <b>Mars</b>     | -0,69  | +0,74  | +0,6   | +0,56  |
| <b>Avril</b>    | -0,61  | -0,57  | +0,97  | +0,96  |
| <b>Mai</b>      | -0,65  | -0,78  | -0,87  | -0,66  |

*Calculated on 38 observations Regression Coefficients with 95% confidence interval and prob-value  
12 années manquantes*

## b) Précipitations

### Précipitations mensuelles sous forme de pluie

Oscillant entre un  $R^2$  de 0,14 pour l'épinette en bas de pente et 0,19 pour le pin gris en bas de pente (Tableau 4.9), les arbres ne démontrent pas de sensibilité marquée aux précipitations. Les deux coefficients significatifs sont ceux, dans une moindre mesure, de l'épinette sur affleurement qui réagit négativement aux précipitations de décembre, et celui plus affirmé, du pin gris sur affleurement qui réagit négativement aux précipitations d'avril.

Tableau 4.9: Réponses aux précipitations mensuelles pour la période 1950-2000 (CRU) (Groupe « étude ») (Surlignage rouge= valeurs négativement significatives).

|           | L15-EM | L15-EX | L15-PM | L15-PX |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| $R^2$     | 0,14   | 0,16   | 0,19   | 0,15   |
| RMSE      | 0,10   | 0,10   | 0,19   | 0,19   |
| Octobre   | -0,67  | +0,56  | +0,72  | +0,77  |
| Novembre  | -0,66  | -0,71  | -0,64  | -0,76  |
| Décembre  | -0,9   | -0,98  | -0,63  | +0,69  |
| Janvier   | -0,9   | -0,78  | -0,66  | -0,67  |
| Février   | -0,54  | +0,71  | -0,76  | +0,56  |
| Mars      | +0,7   | +0,65  | +0,58  | -0,65  |
| Avril     | -0,68  | -0,63  | -0,94  | -0,99  |
| Mai       | -0,7   | -0,64  | +0,61  | +0,56  |
| Juin      | +0,75  | +0,74  | -0,78  | -0,52  |
| Juillet   | +0,53  | -0,65  | -0,87  | -0,88  |
| Août      | +0,51  | +0,7   | -0,78  | -0,73  |
| Septembre | -0,77  | -0,7   | -0,89  | -0,52  |

Calculated on 51 observations Regression Coefficients with 95% confidence interval and prob-value

## Précipitations moyennes de neige

Les arbres ne présentent pas de sensibilité apparente au total des précipitations neigeuses. Avec un faible  $R^2$  de 0,16 pour l'épinette noire en affleurement et un maximum de 0,29 pour le pin gris en affleurement (Tableau 4.10), la seule sensibilité apparente, quoi que faible, est le pin gris sur affleurement pour les mois de décembre et de février.

Tableau 4.10: Réponses à la quantité de neige moyenne pour la période 1961-2005 (D. Tapsoba, IREQ) (Groupe « étude ») (Surlignage gris= valeurs près du seuil de signification).

|                 | L15-EM | L15-EX | L15-PM | L15-PX       |
|-----------------|--------|--------|--------|--------------|
| <b>R2</b>       | 0,19   | 0,16   | 0,22   | 0,29         |
| <b>RMSE</b>     | 0,10   | 0,11   | 0,22   | 0,20         |
| <b>Octobre</b>  | +0,62  | +0,76  | -0,92  | -0,91        |
| <b>Novembre</b> | -0,9   | -0,8   | +0,74  | +0,82        |
| <b>Décembre</b> | -0,63  | -0,56  | +0,89  | <b>+0,95</b> |
| <b>Janvier</b>  | +0,84  | +0,78  | +0,53  | -0,64        |
| <b>Février</b>  | +0,69  | +0,84  | +0,9   | <b>+0,97</b> |
| <b>Mars</b>     | +0,67  | +0,6   | +0,78  | +0,86        |
| <b>Avril</b>    | -0,85  | -0,66  | +0,64  | +0,7         |
| <b>Mai</b>      | -0,67  | -0,75  | -0,65  | -0,75        |

*Calculated on 45 observations Regression Coefficients with 95% confidence interval and prob-value*

## Hauteur de la neige

Les  $R^2$  obtenus pour cette fonction de réponse varient de 0,10 pour le pin gris sur affleurement à 0,31 pour l'épinette noire sur affleurement (Tableau 4.11). Les arbres des quatre groupes présentent une sensibilité significative et positive à la hauteur de la neige pour le mois de février, bien que n'expliquant très peu de variance chez le pin gris sur affleurement. Pour le mois de mars, seules les épinettes répondent de façon significative, mais cette fois-ci, négativement. Le groupe des pins gris en bas de pente est le seul à

présenter une sensibilité significative, de façon négative, à la hauteur de la neige au mois d'avril.

**Tableau 4.11: Réponses à la hauteur de la neige pour la période 1961-2005 (D. Tapsoba, IREQ) (Groupe « étude ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives; surlignage rouge= valeurs négativement significatives).**

|             | L15-EM | L15-EX | L15-PM | L15-PX |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| <i>R2</i>   | 0,27   | 0,31   | 0,18   | 0,10   |
| <i>RMSE</i> | 0,09   | 0,09   | 0,21   | 0,21   |
| Février     | +1     | +1     | +0,99  | +0,99  |
| Mars        | -1     | -1     | -0,81  | -0,82  |
| Avril       | -0,78  | -0,53  | -0,99  | -0,77  |

*Calculated on 56 observations Regression Coefficients with 95% confidence interval and prob-value*

### Densité de la neige

Le  $R^2$  le plus bas est celui issu du groupe pin gris en bas de pente, et il est de 0,11, alors que le plus élevé est celui issu du groupe pin gris sur affleurement et est de 0,14 (Tableau 4.12). La densité de la neige n'explique donc que très faiblement les variations de croissance, cependant, les quatre groupes réagissent négativement et de façon significative à la densité de la neige au moins de février. Il n'y a que le groupe pin gris sur affleurement qui indique une sensibilité positive à la densité de la neige du mois d'avril. Ces observations confirment celles obtenues avec l'épaisseur de la neige.

**Tableau 4.12: Réponses à la densité de la neige pour la période 1961-2005 (D. Tapsoba, IREQ) (Groupe « étude ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives; surlignage rouge= valeurs négativement significatives).**

|             | L15-EM | L15-EX | L15-PM | L15-PX |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| <i>R2</i>   | 0,11   | 0,12   | 0,11   | 0,14   |
| <i>RMSE</i> | 0,10   | 0,11   | 0,22   | 0,21   |
| Février     | -1     | -1     | -1     | -1     |
| Mars        | -0,55  | -0,55  | +0,69  | -0,54  |
| Avril       | -0,57  | -0,57  | +0,91  | +0,99  |

*Calculated on 56 observations Regression Coefficients with 95% confidence interval and prob-value*

### Équivalent en eau de la neige

Le groupe des pins gris sur affleurement présentent le  $R^2$  le plus bas, soit 0,04, alors que le groupe des épinettes sur affleurement présentent le plus élevé, 0,27 (Tableau 4.13). Les quatre groupes, à l'exception du pin gris sur affleurement, présentent une sensibilité positive et significative au régresseur pour le mois de février. Pour ce qui est du mois de mars, les épinettes provenant des deux groupes démontrent une sensibilité négative significative. Pour le mois d'avril, seul le groupe des pins gris en bas de pente présente une sensibilité significative, et négative.

**Tableau 4.13: Réponses à l'équivalent en eau de la neige pour la période 1961-2005 (D. Tapsoba, IREQ) (Groupe « étude ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives; surlignage rouge= valeurs négativement significatives).**

|             | L15-EM | L15-EX | L15-PM | L15-PX |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| <i>R2</i>   | 0,23   | 0,27   | 0,09   | 0,04   |
| <i>RMSE</i> | 0,10   | 0,10   | 0,22   | 0,22   |
| Février     | +0,99  | +1     | +0,99  | +0,77  |
| Mars        | -1     | -1     | -0,53  | -0,7   |
| Avril       | -0,88  | -0,63  | -0,99  | -0,61  |

*Calculated on 56 observations Regression Coefficients with 95% confidence interval and prob-value*

### **c) Regroupement des régresseurs les plus significatifs**

Afin de tenter de construire un modèle de croissance à partir des variables climatiques, les régresseurs les plus significatifs ont été sélectionnés et regroupés. Les fonctions de réponses ont été faites sur les quatre mêmes séries et chaque variable recouvre la même période qu'en fonction de réponse individuelle. Le premier groupe représente les meilleurs régresseurs pour les épinettes noires, le second groupe les meilleurs régresseurs pour les pins gris, et le troisième groupe les meilleurs régresseurs obtenus pour les deux espèces dans les deux milieux.

#### **Meilleurs régresseurs combinés pour l'épinette noire**

La combinaison des régresseurs a augmenté les  $R^2$  mais n'a pas eu d'influence sur la réponse aux précipitations ni aux données de neige. Par contre, cela a renforcé la réponse aux températures de décembre-janvier et d'avril pour l'épinette noire (Tableau 4.14). Pour les températures de décembre-janvier, l'épinette en milieu xérique affiche une réponse de +1 alors que les résultats n'étaient pas significatifs lors de l'essai précédent. Pour les températures du mois d'avril la réponse est passée de +0,98 et +0,99 à +1 pour les deux milieux.

Tableau 4.14: Meilleurs régresseurs combinés pour l'épinette noire (Groupe « étude ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives; surlignage gris= valeurs près su seuil de signification).

|   | L15-EM | L15-EX | L15-PM | L15-PX |
|---|--------|--------|--------|--------|
| <i>R2</i>                                     | 0,38   | 0,43   | 0,42   | 0,48   |
| <i>RMSE</i>                                   | 0,08   | 0,08   | 0,18   | 0,16   |
| Précipitations - Novembre, Décembre, Janvier  | -0,84  | -0,81  | -0,85  | -0,84  |
| Températures - Décembre, Janvier              | +0,89  | +1     | +0,98  | +0,97  |
| Températures - Avril                          | +1     | +1     | +0,88  | +0,95  |
| Neige moyenne - Novembre, Décembre            | -0,56  | -0,62  | +0,98  | +1     |
| Hauteur neige - Février, Mars                 | -0,72  | +0,65  | -0,79  | +0,57  |
| Densité neige - Février                       | -0,59  | +0,63  | -0,84  | -0,78  |
| Équivalent en eau de la neige - Février, Mars | +0,65  | +0,52  | +0,87  | +0,81  |

### Meilleurs régresseurs combinés pour le pin gris

Encore une fois, la combinaison des régresseurs a augmenté les  $R^2$  mais n'a pas eu d'influence sur la réponse aux précipitations ni aux données de neige. La seule amélioration se trouve aux températures de décembre-janvier (Tableau 4.15). Lors de l'essai précédent, le pin gris en milieu mésique affichait +0,99 alors qu'ici il est passé à +1.

Tableau 4.15: Meilleurs régresseurs combinés pour le pin gris (Groupe « étude ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives; surlignage gris= valeurs près su seuil de signification).

|   | L15-EM | L15-EX | L15-PM | L15-PX |
|---|--------|--------|--------|--------|
| <i>R2</i>                                     | 0,37   | 0,43   | 0,40   | 0,50   |
| <i>RMSE</i>                                   | 0,08   | 0,08   | 0,18   | 0,15   |
| Précipitations - Avril                        | +0,69  | +0,74  | -0,8   | -0,88  |
| Températures - Décembre, Janvier              | +0,91  | +0,99  | +1     | +0,95  |
| Températures - Avril                          | +0,99  | +0,99  | +0,8   | +0,86  |
| Neige moyenne - Novembre, Décembre            | -0,66  | +0,53  | +0,83  | +0,97  |
| Hauteur neige - Février, Mars                 | -0,76  | +0,67  | -0,68  | +0,66  |
| Densité neige - Février                       | -0,62  | +0,63  | -0,74  | -0,73  |
| Équivalent en eau de la neige - Février, Mars | +0,61  | -0,5   | +0,83  | +0,76  |

## Meilleurs régresseurs combinés pour les deux espèces

En procédant à une analyse ne comportant que les meilleurs régresseurs, les réponses sont renforcées pour les quatre dendroséries (Tableau 4.16). On peut en déduire que l'épinette noire et le pin gris ont des réponses similaires à ces variables climatiques à l'exception de la sensibilité du pin gris au couvert neigeux.

Tableau 4.16: Meilleurs régresseurs combinés pour les deux espèces (Groupe « étude ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives).

|                                    | L15-EM | L15-EX | L15-PM | L15-PX |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| <i>R2</i>                          | 0,32   | 0,36   | 0,32   | 0,36   |
| <i>RMSE</i>                        | 0,09   | 0,09   | 0,19   | 0,17   |
| Températures - Décembre, Janvier   | +0,99  | +1     | +1     | +1     |
| Températures - Avril               | +0,99  | +1     | +0,9   | +0,98  |
| Neige moyenne - Novembre, Décembre | -0,7   | +0,61  | +0,98  | +1     |

## Fonctions de réponses arbre par arbre avec les trois meilleurs régresseurs

Tel que mentionné précédemment, afin d'obtenir une analyse plus fine de la réponse des arbres aux différentes variables climatiques testées, les trois meilleurs régresseurs ont été testés sur chaque arbre des quatre séries. Le tableau 4.17 indique le pourcentage d'arbres répondant de façon significative. Traités de cette façon, les arbres répondent tous positivement à l'exception d'une épinette en milieu mésique qui a une réponse négative au couvert neigeux.

**Tableau 4.17: Pourcentages d'arbres présentant une réponse significative (Groupe « étude »).**

|   | <b>L15-EM</b> | <b>L15-EX</b> | <b>L15-PM</b> | <b>L15-PX</b> |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Températures - Décembre, Janvier</b>   | 24%           | 27%           | 20%           | 43%           |
| <b>Températures - Avril</b>               | 35%           | 37%           | 3%            | 20%           |
| <b>Neige moyenne - Novembre, Décembre</b> | 3%            | 3%            | 10%           | 37%           |

### **4.3.2 Fonctions de réponses groupe « témoin »**

Dans le but de renforcer les résultats obtenus lors des fonctions de réponse du groupe « étude », certaines variables climatiques ont été testées sur les dendroséries du groupe « témoin ». Les arbres du groupe « témoin », tel que décrits précédemment, proviennent tous de sites mésiques et sont homogènes sur le plan du drainage et de la compétition.

#### **a) Températures**

##### **Températures mensuelles**

Il n'y a pas pratiquement pas de différence entre le groupe « étude » et le groupe « témoin » : seule la série NORD du deuxième groupe répond de façon marquée aux températures mensuelles du mois de juillet (Tableau 4.18), alors que les deux séries de pin gris du premier groupe y étaient aussi sensibles.

Tableau 4.18: Réponses aux températures mensuelles pour la période 1950-1993 (CRU) (Groupe « témoin ») (Surlignage vert= valeurs positivement significatives; surlignage gris= valeurs près du seuil de signification).

|                  | LG4   | NORD  | UK    | VPG   |
|------------------|-------|-------|-------|-------|
| <b>R2</b>        | 0,45  | 0,44  | 0,31  | 0,25  |
| <b>RMSE</b>      | 0,18  | 0,18  | 0,33  | 0,29  |
| <b>Octobre</b>   | -0,70 | -0,59 | +0,54 | -0,61 |
| <b>Novembre</b>  | -0,88 | -0,90 | -0,61 | -0,58 |
| <b>Décembre</b>  | +0,72 | +0,94 | +0,97 | +0,80 |
| <b>Janvier</b>   | +0,66 | +0,55 | +0,58 | -0,52 |
| <b>Février</b>   | -0,71 | +0,90 | +0,82 | +0,69 |
| <b>Mars</b>      | -0,61 | +0,79 | -0,54 | -0,58 |
| <b>Avril</b>     | +0,96 | +0,50 | +0,63 | +0,57 |
| <b>Mai</b>       | +0,68 | -0,87 | -0,60 | -0,68 |
| <b>Juin</b>      | -0,84 | -0,96 | -0,89 | -0,80 |
| <b>Juillet</b>   | +0,84 | +1    | +0,87 | +0,68 |
| <b>Août</b>      | +0,64 | -0,88 | -0,92 | -0,89 |
| <b>Septembre</b> | -0,71 | +0,84 | +0,65 | +0,70 |

Calculated on 44 observations Regression Coefficients with 95% confidence interval and prob-value

## b) Précipitations

### Précipitations mensuelles sous forme de pluie

À l'instar du pin gris en affleurement rocheux du groupe « étude », deux séries du groupe « témoin », UK et VPG, répondent de façon significative aux précipitations du mois d'avril (Tableau 4.19). Ces mêmes séries répondent également aux précipitations du mois d'octobre. VPG est aussi sensible aux précipitations du mois de novembre, de juin et de septembre, UK, octobre et août, alors que LG4 est sensible à celles de décembre. Ces valeurs dispersées démontrent que dans l'ensemble, les arbres du groupe « témoin » ne répondent pas aux précipitations de façon plus éloquente que le groupe « étude ».

**Tableau 4.19: Réponses aux précipitations mensuelles pour la période 1950-1993 (CRU) (Groupe « témoin »)** (Surlignage vert= valeurs positivement significatives; surlignage rouge= valeurs négativement significatives; surlignage gris= valeurs près su seuil de signification).

|                  | <b>LG4</b> | <b>NORD</b> | <b>UK</b> | <b>VPG</b> |
|------------------|------------|-------------|-----------|------------|
| <b>R2</b>        | 0,48       | 0,40        | 0,53      | 0,63       |
| <b>RMSE</b>      | 0,18       | 0,19        | 0,27      | 0,21       |
| <b>Octobre</b>   | -0,63      | -0,90       | -1        | -0,99      |
| <b>Novembre</b>  | +0,87      | -0,83       | +0,65     | +0,99      |
| <b>Décembre</b>  | -0,99      | -0,71       | -0,85     | -0,89      |
| <b>Janvier</b>   | -0,91      | +0,65       | +0,89     | +0,78      |
| <b>Février</b>   | -0,64      | -0,65       | +0,55     | -0,93      |
| <b>Mars</b>      | +0,83      | +0,64       | +0,53     | +0,58      |
| <b>Avril</b>     | -0,97      | -0,97       | -1        | -0,99      |
| <b>Mai</b>       | +0,88      | -0,52       | +0,60     | -0,63      |
| <b>Juin</b>      | +0,73      | +0,92       | +0,84     | +0,96      |
| <b>Juillet</b>   | +0,60      | -0,54       | +0,56     | +0,75      |
| <b>Août</b>      | +0,63      | -0,80       | -0,98     | -0,89      |
| <b>Septembre</b> | +0,98      | -0,79       | -0,85     | -1         |

*Calculated on 44 observations Regression Coefficients with 95% confidence interval and prob-value*

### Précipitations moyennes de neige

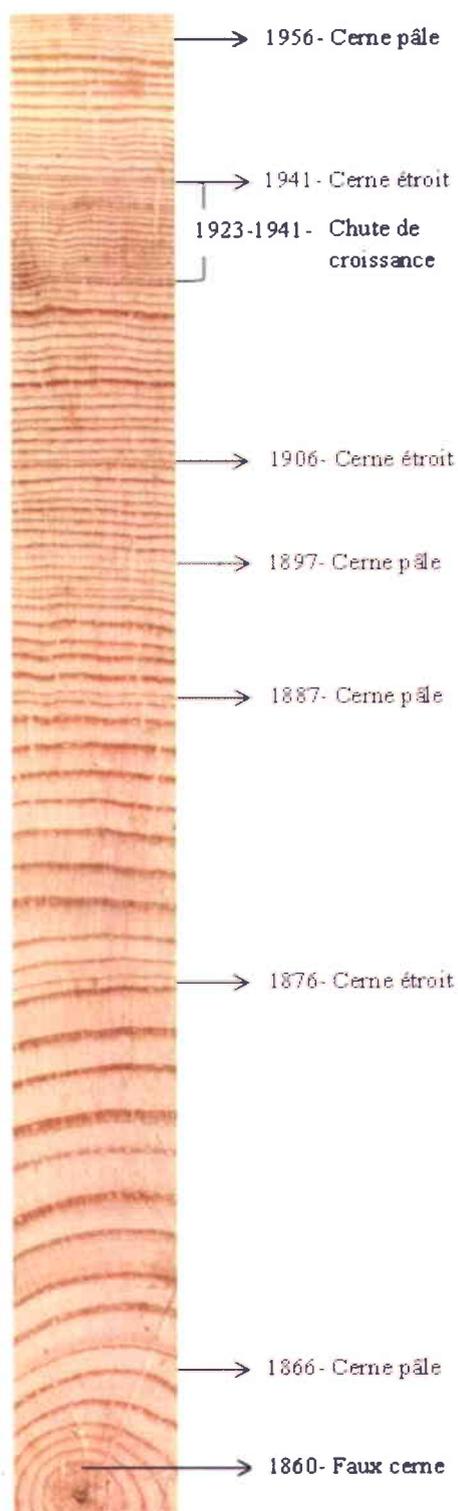
Les pins gris du groupe « témoin » ne sont pas plus influencés par les précipitations moyennes de neige que ceux du groupe « étude ». Dans le groupe « témoin », seulement ceux provenant du site VPG y présentent une sensibilité en octobre (Tableau 4.20), alors que dans le groupe « étude », le pin gris en milieu xérique y était sensible en décembre et en février.

Tableau 4.20: Réponses aux précipitations moyennes de neige pour la période 1961-1994 (D. Tapsoba, IREQ) (Groupe « témoin ») (Surlignage rouge= valeurs négativement significatives; surlignage gris= valeurs près su seuil de signification).

|                  | LG4   | NORD  | UK    | VPG   |
|------------------|-------|-------|-------|-------|
| <b>R2</b>        | 0,46  | 0,29  | 0,37  | 0,42  |
| <b>RMSE</b>      | 0,19  | 0,18  | 0,26  | 0,24  |
| <b>Septembre</b> | -0,56 | +0,78 | -0,51 | +0,95 |
| <b>Octobre</b>   | +0,88 | -0,81 | -0,76 | -0,98 |
| <b>Novembre</b>  | +0,90 | -0,76 | +0,91 | +0,65 |
| <b>Décembre</b>  | -0,66 | +0,70 | +0,83 | +0,81 |
| <b>Janvier</b>   | -0,53 | -0,57 | -0,58 | -0,61 |
| <b>Février</b>   | +0,52 | +0,51 | +0,71 | +0,65 |
| <b>Mars</b>      | -0,59 | +0,90 | -0,70 | +0,66 |
| <b>Avril</b>     | -0,70 | +0,52 | -0,82 | -0,56 |
| <b>Mai</b>       | +0,74 | +0,72 | -0,91 | -0,66 |

Calculated on 34 observations Regression Coefficients with 95% confidence interval and prob-value

### 4.3.3 Particularités de la croissance: chronologies de cernes diagnostiques, incomplets et chutes de croissance (groupe « étude »)



Les cernes diagnostiques ont tout d'abord été recensés chez l'épinette noire, et ensuite chez le pin gris (Figure 4.9). Les cernes incomplets et les chutes de croissance ont été relevés chez le pin gris, mais ne sont pas présents chez l'épinette. Les données suivantes décrivent les événements relevés chez les 61 pins gris en affleurement rocheux et les 19 pins gris en bas de pente du Lac 15 (groupe « étude ») pour la période 1801 à 2010.

#### Cernes diagnostiques

Plusieurs cernes diagnostiques ont été recensés mais seuls les cernes ayant une fréquence d'apparition supérieure à 20% dans la série xérique ou la série mésique ont été retenus (Tableau 4.21). Les cernes diagnostiques ayant les plus hautes fréquences d'apparition sont les cernes pâles de 1866, 1887 et de 1897. À l'exception des cernes pâles de 1912 et de 1956, les pins en milieux xériques présentent les plus hautes fréquences d'apparition.

**Figure 4.9: Chronologie de cernes diagnostiques (groupe « étude »).**

**Tableau 4.21: Fréquence relative des cernes diagnostiques chez le pin gris du lac 15 (groupe « étude »).**

| <b>Année</b> | <b>Nature du cerne</b> | <b>L15-PM (%)</b> | <b>L15-PX (%)</b> |
|--------------|------------------------|-------------------|-------------------|
| 1860         | Faux cerne             | 11                | 38                |
| 1866         | Cerne pâle             | 32                | 52                |
| 1876         | Cerne étroit           | 42                | 44                |
| 1887         | Cerne pâle             | 26                | 61                |
| 1897         | Cerne pâle             | 58                | 89                |
| 1906         | Cerne étroit           | 37                | 38                |
| 1912         | Cerne pâle             | 32                | 2                 |
| 1941         | Cerne étroit           | 16                | 38                |
| 1956         | Cerne pâle             | 37                | 31                |

### **Cernes incomplets**

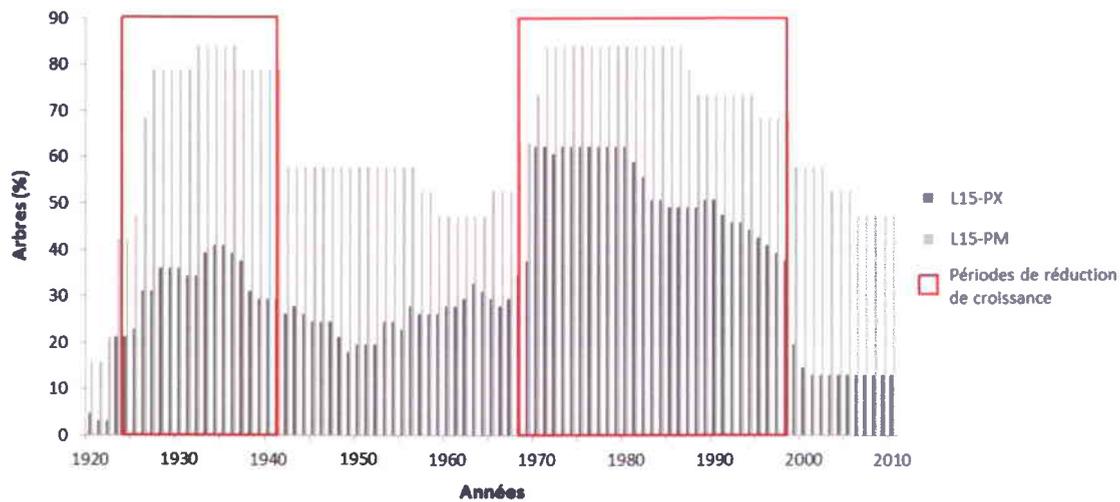
Tel que mentionné à quelques reprises, les pins gris échantillonnés au Lac 15 (groupe « étude ») montrent des anomalies de croissance, notamment des cernes incomplets. Ces derniers ont été répertoriés avec le plus d'exactitude possible, compte tenu de la difficulté de déterminer les années exactes dans l'enchevêtrement de cellules que constituent les zones problématiques dans lesquelles ses anomalies se trouvent. Tout comme pour les cernes diagnostiques, les années retenues sont celles dont la fréquence d'apparition d'un cerne incomplet est supérieure à 20% (Tableau 4.22) pour la série xérique ou mésique. Le cerne incomplet le plus fréquent est celui de l'année 1981. Tel que mentionné précédemment pour les cernes diagnostiques, les plus hautes fréquences d'apparition se trouvent en milieu sec.

Tableau 4.22: Fréquence relative des cernes incomplets chez le pin gris du Lac 15 (groupe « étude »).

| Année | L15-PM (%) | L15-PX (%) |
|-------|------------|------------|
| 1941  | 21         | 16         |
| 1970  | 16         | 30         |
| 1971  | 21         | 34         |
| 1972  | 16         | 30         |
| 1974  | 21         | 16         |
| 1980  | 16         | 25         |
| 1981  | 37         | 48         |
| 1982  | 16         | 25         |
| 1985  | 16         | 25         |
| 1986  | 11         | 21         |
| 1987  | 21         | 11         |
| 1994  | 16         | 20         |
| 1995  | 21         | 11         |
| 1998  | 21         | 10         |

### Chutes de croissance

Les pins gris du Lac 15 présentent, en majorité, des périodes de forte réduction de croissance. Pendant ces épisodes difficiles, les cernes annuels sont parfois constitués d'une seule rangée de cellules. Les individus amorcent et émergent des chutes de croissance à quelques années de différence. Pour chaque arbre, les années de très faible croissance ont été déterminées. Une analyse de fréquence de ces années a permis d'établir deux périodes de chute de croissance, soit de 1923 à 1941 et de 1968 à 1998, avec une récurrence plus marquée pour la période plus récente (encadrées en rouge dans la figure 4.10). Cette figure montre le pourcentage d'arbres présentant une forte réduction de croissance pour les années incluses dans la période 1920-2000.



**Figure 4.10: Pourcentage d'individus présentant une chute de croissance par année pour la période 1920-2010 (groupe « étude »).**

Les pins gris du groupe « étude » présentent, en milieu sec comme en milieu humide, des chutes de croissance synchrones entre les individus, indépendamment des micro-sites (crêtes) desquels ils proviennent (Figure 4.11). Les individus issus de l'incendie ayant eu lieu dans les années 1840 forment une population équiennne (carrés noirs); il est aisé de constater le synchronisme des diminutions de croissance (illustré par les traits gris pâle). Il est à noter que les diminutions progressives se retrouvent plus souvent chez les individus plus âgés (traits gris foncé), c'est-à-dire chez ceux ayant survécu au feu qui a donné naissance à la plus jeune cohorte. La première période de réduction de croissance, soit de 1923-1941, est moins généralisée entre les individus, alors que la deuxième, soit de 1968-1998, se retrouve chez la majorité des arbres échantillonnés et ce, en milieux mésique et xérique.

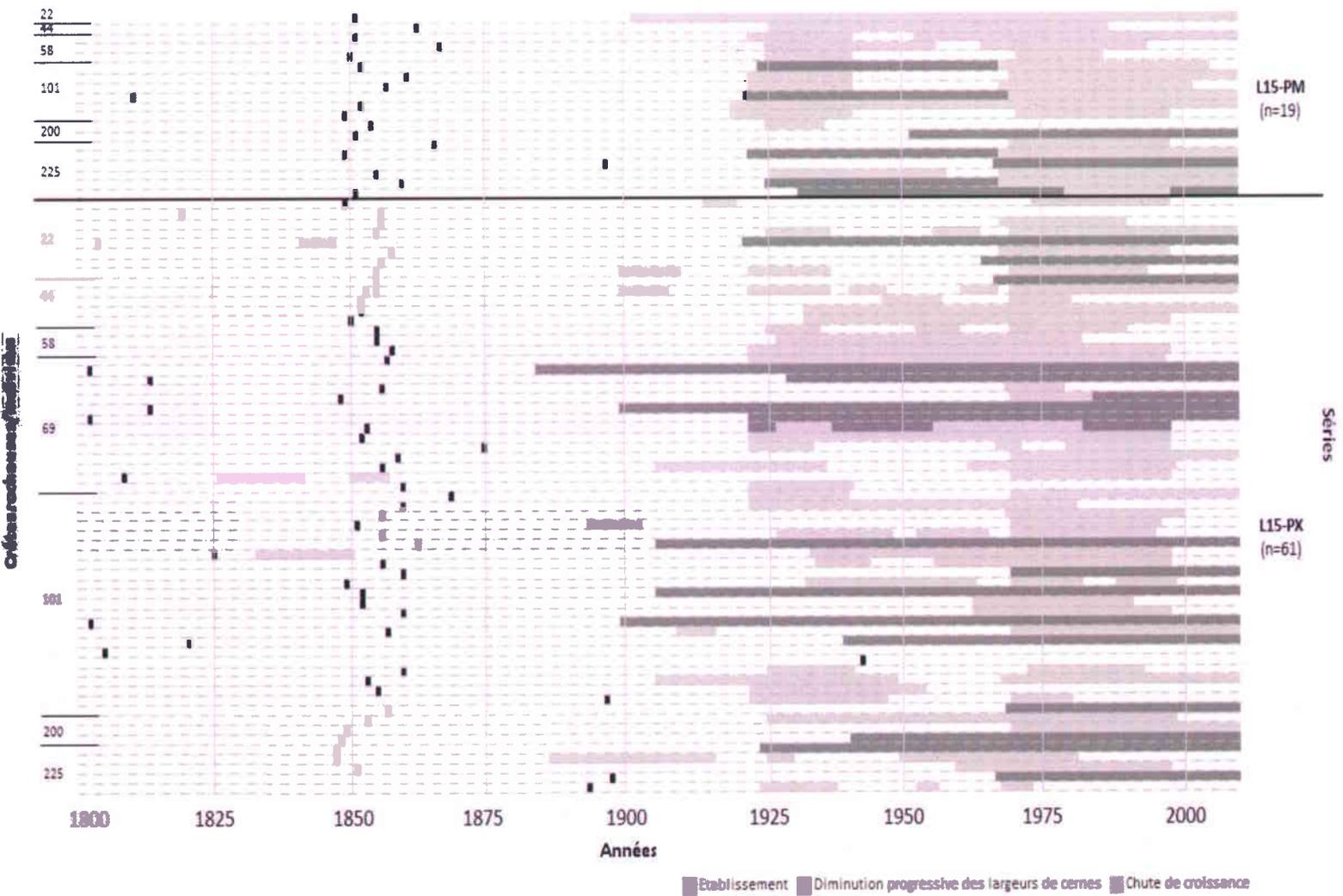


Figure 4.11 : Synchronisme des chutes de croissance retrouvées chez le pin gris (groupe « étude »).



## **5 . DISCUSSION**

### **5.1 Croissance comparée du pin gris et de l'épinette noire selon le drainage**

Les résultats obtenus lors de l'analyse de la croissance des deux espèces dans les deux milieux contrastés indiquent que les arbres des milieux xériques produisent, en moyenne, de plus petits cernes annuels que les arbres en milieu mésique. Les résultats montrent une plus grande croissance cumulée pour les deux espèces en milieu mésique qu'en milieu xérique, ce qui confirme que les milieux secs présentent effectivement des conditions de stress pour les arbres. Par contre, malgré cette différence quantitative, la comparaison inter-milieux chez une même espèce montre des patrons de croissance (standardisés) similaires (Figure 4.3), laissant croire que le milieu duquel ils proviennent n'a pas une influence significative sur le rythme de croissance.

Lorsque les deux espèces sont comparées entre elles, il semble que le pin gris a une meilleure croissance que l'épinette noire. Ce résultat est probablement attribuable au fait que le pin a une phase juvénile beaucoup plus productive que l'épinette. En effet, durant les 20 premières années de vie, le pin pris a une des croissances les plus rapides parmi les conifères (Rudolph et Laidly, 1990), jusqu'à 50 cm en hauteur par année (Longpré *et al.*, 1994). Le pin atteint la maturité vers les 70-80 ans (Ministère des Ressources Naturelles Québec, 2011) et dans le même temps surviennent les premiers signes de dégénérescence (75 ans) (Cayford et McRae, 1983). De 75 ans à la fin de vie, les pins gris des deux groupes et des deux milieux ont une production de bois tout à fait similaire. Cet avantage, en ce qui a trait à la production totale de bois, peut expliquer en partie ces résultats étonnants.

Il est toutefois indiscutable que le pin gris possède une plus grande variabilité de croissance que l'épinette noire. Ce fait est appuyé par les patrons de croissance (Figure 4.2) et les résultats de sensibilité moyenne (Tableau 4.1). Bien qu'équivalents entre les deux milieux, (0,15-0,16 pour l'épinette et 0,23-0,24 pour le pin), les indices supérieurs retrouvés chez le pin gris confirment que ce dernier présente réellement une plus grande variabilité inter-annuelle de la croissance.

## **5.2 Croissance comparée du pin gris selon le drainage**

Lors de la comparaison de la croissance des pins gris provenant des deux milieux, il a été démontré que les pins gris en milieu xérique ont une croissance cumulée plus faible que ceux provenant des milieux mésiques, ce qui confirme la disponibilité en eau comme facteur limitant la croissance. À l'instar de la comparaison avec l'épinette noire, la comparaison inter-milieux pour le pin gris montre des patrons de croissance (standardisés) similaires (Figure 4.3), ce qui permet de supposer que la différence d'eau disponible entre les deux milieux n'est pas suffisante pour causer une influence significative sur le rythme de croissance.

Puisque le pin gris montre une plus grande sensibilité que l'épinette noire (Tableau 4.1), il est intéressant de comparer la sensibilité retrouvée dans les deux milieux chez les séries de pin gris. Puisque la question de départ était de déterminer si le pin gris est plus sensible aux précipitations en milieu sec, à la lumière des résultats obtenus une autre question se pose : est-ce que les arbres qui poussent peu (milieux secs) sont plus sensibles? L'indice de sensibilité moyenne le plus élevé se retrouve dans la série VPG (0,29), suivie de près par la série LG4 (0,28) (Tableau 4.5), toutes deux provenant de milieu mésique. Il semble donc que la sensibilité moyenne ne soit pas liée au rythme de

croissance des individus et qu'elle serait plutôt propre aux espèces, puisque, dans le cas présent, l'indice de sensibilité du pin gris en milieu xérique (0,24) n'est en aucun cas le plus faible des six dendroséries comparées, mais se retrouve plutôt dans la moyenne (0,25).

## **5.3 Relations avec le climat**

### **5.3.1 Fonctions de réponses**

Lors du calcul des fonctions de réponse, il est apparu que le pin gris est sensible au couvert neigeux, aux précipitations en neige de décembre, ainsi qu'aux températures de décembre, janvier et avril. Cette observation concorde avec les conclusions des études de Hofgaard *et al.* (1999) et de Huang *et al.* (2010) stipulant que l'espèce est favorisée par un début de croissance hâtif. La neige présente au sol lors de la fonte printanière peut constituer une ressource en eau suffisante permettant au pin d'amorcer sa croissance.

Les résultats permettent aussi d'énoncer que le pin gris ne montre pas plus de sensibilité aux précipitations que l'épinette malgré sa plus grande sensibilité moyenne. Ce constat peut être attribué au fait que la méthode des fonctions de réponse est stationnaire. En effet, le facteur limitant de la croissance des arbres à cette latitude est tout d'abord la température, et la zone d'étude comporte un deuxième facteur limitant : le drainage. Il est possible que les deux facteurs deviennent le principal facteur limitant à tour de rôle, ce qui crée une relation non-stationnaire indétectable par les fonctions de réponse. Il est aussi à considérer que les fonctions de réponse ont été calculées à l'aide de données climatiques modélisées à l'échelle régionale; il n'est pas impossible qu'un résultat différent aurait été obtenu si les calculs avaient été réalisés avec des données climatiques journalières à l'échelle locale.

Les résultats non significatifs en ce qui a trait à la sensibilité aux précipitations peuvent aussi être une conséquence de la physiologie du pin gris. En effet, tel que mentionné précédemment, l'espèce possède un système racinaire beaucoup plus performant que l'épinette noire (Burns et Honkala, 1990), lui conférant une haute tolérance au stress hydrique (Rudolph et Laidly, 1990). De plus, lors d'une étude (Marshall *et al.*, 2000) portant sur une sécheresse contrôlée (durée de dix jours) visant l'épinette noire, l'épinette blanche et le pin gris, il a été démontré que lorsque les aiguilles des trois espèces sont réhydratées, celles du pin gris retrouvent leur plein volume saturé en eau, alors que ce n'est pas le cas des deux espèces d'épinette, ce qui indique encore une fois un métabolisme mieux adapté aux conditions sèches. Ces constats sont aussi confirmés et résumés par Blake et Li (2001) (traduction libre), « le pin gris se déshydrate plus lentement que l'épinette noire... le pin gris a un système racinaire plus important, une plus petite aire d'évaporation aux aiguilles et une conductance spécifique inférieure à l'épinette noire. Ces caractéristiques statiques font en sorte qu'il est plus tolérant à la sécheresse, c'est pourquoi il s'établit souvent dans des sites trop chauds et secs pour l'épinette noire ». Il est donc possible que tous ces mécanismes physiologiques lui permettent de compenser de faibles précipitations, d'où l'absence de réactivité aux précipitations lors des calculs de fonctions de réponse.

### **5.3.2 Particularités: chutes de croissance (groupe « étude »)**

Pour ce qui est des chutes de croissance recensées chez le pin gris, plusieurs hypothèses sont permises. Puisqu'il s'agit d'évènements recensés uniquement chez le pin, il est très peu probable que la cause soit un facteur de site. Tout d'abord, il n'est pas impossible qu'il s'agisse d'embolies dues à des conditions climatiques défavorables à un début de croissance régulier. Toutefois, selon Blake et Li (2001), en raison de ses caractéristiques physiologiques, l'épinette noire est plus susceptible à ce type d'évènement. Aussi, la durée des épisodes problématiques semble contredire cette idée. Compte tenu de la durée des épisodes de chutes de croissance recensées, soit de 1923-1941 et 1968-1998, il serait fort étonnant que les conditions climatiques nécessaires à la formation de ces bulles d'air

nuisibles à la croissance aient été présentes toutes ces années. Des données journalières stationnelles seraient nécessaires afin de confirmer ou infirmer cette théorie, et ces données ne sont pas disponibles.

Une autre hypothèse concerne les précipitations. Tel que démontré auparavant, la physiologie du pin gris lui confère une excellente tolérance aux épisodes secs. Mais qu'en est-il des périodes d'abondantes précipitations? Comment réagit-t-il? La figure 5.1 présente la courbe de croissance (indiquée) du pin gris sur affleurement rocheux mise en relation avec les écarts à la moyenne des précipitations pour les quelques cent dernières années. Une moyenne a été établie sur 30 ans (calibration) et les écarts annuels ont ensuite été calculés. Le graphique montre une relation quasi-inverse entre la croissance et le régime des précipitations.

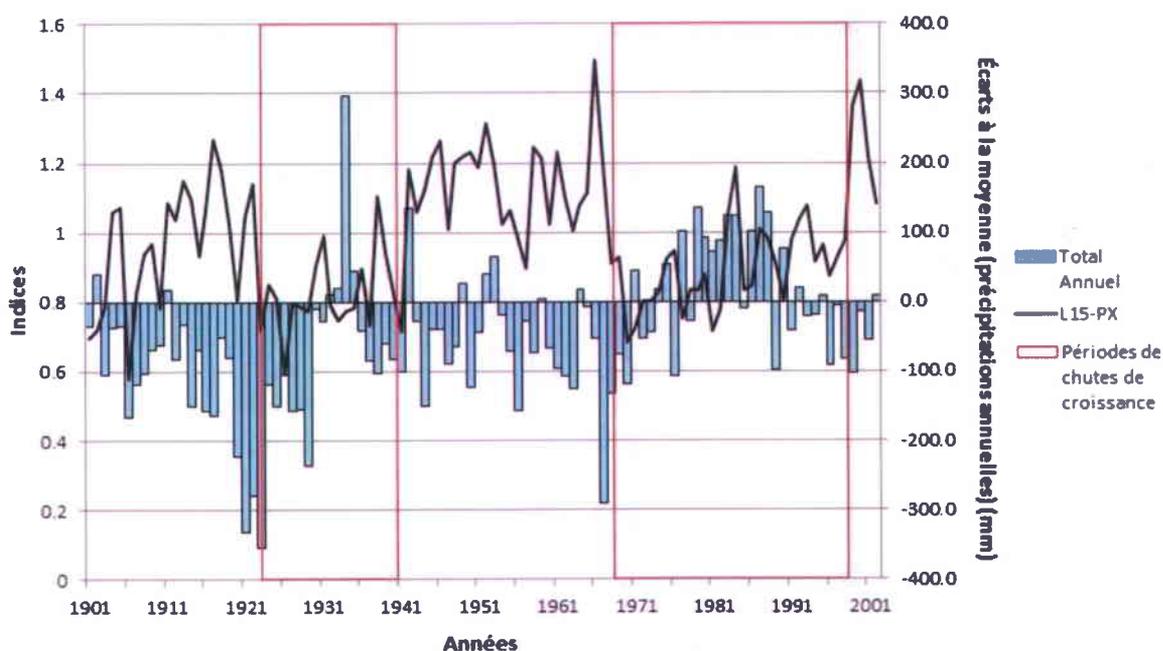
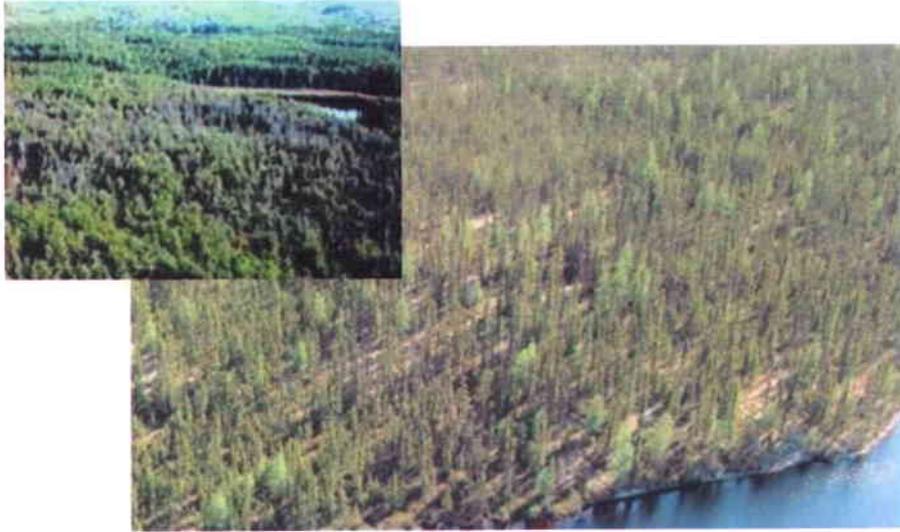


Figure 5.1: Relation entre la croissance du pin gris en milieu sec et les précipitations.

La croissance semble diminuer lors d'incursions positives des précipitations et reprendre lors d'incursions négatives. Ce qui laisse penser qu'il n'est pas impossible qu'une période d'abondantes précipitations puisse limiter la croissance du pin dans les milieux pauvres et secs.

Dans un autre ordre d'idées, puisqu'il s'agit d'éléments synchrones n'affectant que le pin, il est possible que la cause ne soit pas d'ordre climatique, mais phytopathologique, telles des épidémies de diprion de Swaine, ou plus probablement, de nodulier du pin gris. L'hypothèse du nodulier est plus plausible pour les raisons suivantes. Tout d'abord, la répartition géographique. Les épidémies de diprion de Swaine ont ravagé les peuplements purs de pins gris qui croissent au Québec méridional, entre les 47<sup>e</sup> et 48<sup>e</sup> parallèles. Dans les régions plus septentrionales, le développement de l'insecte semble entravé par le froid (ministère des Ressources naturelles Québec, 2013). Le nodulier, par ailleurs, est décrit comme probablement présent jusqu'au sud des Territoires du Nord-Ouest (Ressources naturelles Canada, 2013), à une latitude couvrant largement la zone d'étude. Ensuite, la durée des épisodes de faible croissance implique qu'il s'agirait de défoliations répétées, puisque une épidémie de diprion de Swaine ne dure que trois à quatre ans dans la plupart des cas. Cependant, ces attaques répétées tuent l'hôte; les sujets mourant d'une à quatre années plus tard (Ressources naturelles Canada, 2013). Aussi, l'étude de Grenon (1998) portant sur le nodulier du pin gris dans la région du Lac Saint-Jean, fait mention de vagues de 14 ans où de grands nombres de cicatrices ont été recensées, ce qui pourrait assez bien correspondre, tout au moins, à la première période de chute de croissance. De plus, lors de l'analyse des périodes chutes de croissance, il a été remarqué que les arbres plus âgés n'ont pas été touchés par le phénomène, présentant plutôt une diminution graduelle de l'épaisseur de cernes, alors que le nodulier préfère les arbres les plus jeunes et le diprion les plus âgés. Finalement, les arbres fortement défoliés par le diprion de Swaine affichent des cimes brun-grisâtre, alors que les populations échantillonnées ne présentent pas cette caractéristique (Figure 5.2).



**Figure 5.2: Comparaison entre une forêt ayant subi une sévère défoliation par le diprion de Swaine (en médaillon) et le site d'échantillonnage du groupe "étude" (médaillon : Ressources naturelles Québec).**

Même si de telles épidémies n'ont jamais été répertoriées à cette latitude, il n'est pas déraisonnable de croire que cette hypothèse est plausible. Par contre, les échantillons n'ayant pas été prélevés dans l'objectif d'étudier d'éventuelles épidémies, il n'est malheureusement pas possible de le confirmer.

Bien que le forçage principal demeure le climat, il est concevable que les périodes de chutes de croissance soient une combinaison de tous ces facteurs réunis sous la forme « chutes = (%) précipitations + (%) épidémies + (%) facteur X ». Avec les échantillons et les ressources disponibles, il n'est pas possible de déterminer avec certitude quelle en est la cause principale.



## 6 . CONCLUSION

Sur les crêtes rocheuses et leurs versants, la confrontation des patrons de croissance du pin gris et de l'épinette noire en milieux xériques et mésiques a permis de constater que la croissance n'est pas significativement influencée par le milieu dans lequel les arbres se trouvent. Comme le paramètre principal discriminant les deux milieux est le drainage, il est raisonnable de croire que l'abondance de la ressource hydrique n'est pas un facteur engendrant des écarts de croissance notable entre les deux espèces. Les individus situés en milieu sec produisent bien de plus petits cernes annuels, mais le rythme de croissance et la réponse globale au climat reste la même

Ces faits sont soutenus par les calculs de fonctions de réponse. Les observations faites sur les individus du groupe « étude », renforcées par celles faites sur le groupe « témoin », permettent d'affirmer que le milieu dans lequel le pin gris croît n'a pas une influence significative sur sa réponse au climat. En ce qui concerne la comparaison entre le pin gris et l'épinette noire, le résultat est similaire à celui obtenu par l'étude de Huang *et al.* (2010); il y a une grande similarité du comportement de croissance des deux espèces vis-à-vis du climat. La principale différence concerne la sensibilité du pin gris à l'épaisseur du couvert neigeux qui ne se retrouve pas chez l'épinette noire.

L'analyse en laboratoire a permis de constater que pour les sites échantillonnés, le pin gris présente une croissance irrégulière comportant des épisodes difficiles. Pour un même environnement et les mêmes années calendaires, le pin montre des chutes et des variations de croissance importantes qui ne sont pas visibles chez l'épinette. Plusieurs hypothèses ont été formulées pouvant expliquer en partie ce phénomène, mais les échantillons et les données disponibles ne permettent pas de déterminer avec certitude laquelle de ces hypothèses est la plus plausible.

Donc, l'hypothèse de départ qui stipule que le pin gris serait plus sensible aux précipitations que l'épinette noire, est réfutée. Il est possible ses caractéristiques physiologiques et son rang d'espèce pionnière lui permettent de mieux profiter de la ressource en eau et de compenser les périodes de faibles précipitations.

Dans le contexte actuel des changements climatiques, il est tout approprié de vouloir connaître le passé afin de mieux faire face aux changements de demain. Les arbres longévifs peuvent être une source importante d'information dans le domaine des reconstitutions climatiques. Dans le cadre de la présente étude, il a été remarqué que les arbres plus âgés n'ont pas été touchés par les périodes de chutes de croissance, et n'ont pas enregistré la plupart des cernes diagnostiques. Dans la zone d'étude (Lac 15), un pin gris âgé de 351 ans a été retrouvé vivant (Figure 6.1). Il ne portait aucune trace de pourriture, d'attaque par les insectes, de cicatrice; comme s'il avait été insensible à toutes les perturbations naturelles ayant pu survenir autour de lui. Puisqu'un tel arbre a été retrouvé, il est permis de croire que d'autres témoins du passé détenant cet âge vénérable



**Figure 6.1: Pin gris âgé de 351 ans retrouvé aux abords du Lac 15.**

subsistent ailleurs dans la zone d'étude. Il serait intéressant de constituer une série de référence avec de tels individus. Peut-être possèderaient-ils des patrons de croissance plus linéaires qui permettraient d'obtenir des résultats plus significatifs avec la méthode des fonctions de réponse. Sans perturbation allogène, ils pourraient s'avérer des témoins du climat passé précieux à privilégier lors des reconstitutions fines au niveau local, et peut être même au niveau régional. Pour de telles analyses, il serait recommandé de détenir des données climatiques journalières et régionales, notamment en ce qui a trait aux précipitations et aux températures. De

telles dendroséries permettraient de pousser plus loin l'étude de l'écologie du pin gris afin de mieux connaître sa relation avec son environnement immédiat, ainsi que ses différentes caractéristiques en fonction des classes d'âge. Il serait alors possible de comparer sa réponse au climat en fonction de sa phase de croissance, de mieux connaître la phénologie et l'intra-saisonnalité de l'espèce, ce qui pourrait permettre de discerner de façon plus exacte les variables saisonnières auxquelles il est sensible durant sa croissance.



## RÉFÉRENCES

Agriculture et agroalimentaire Canada, 2010.

<http://res.agr.ca/siscan/nsdb/slc/v3.1/snf/drainage.html>. Consulté en 2011.

Arseneault, D. 2001. Impact of fire behavior on postfire forest development in a homogeneous boreal landscape. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 31, pp. 1367–1374

Arseneault D. 2010, Longues séries dendrochronologiques dans le nord-est de l'Amérique du Nord. *La dendroécologie – Principes, méthodes et applications*, Presses de l'Université Laval, 758 p.

Beaufait, W. B. 1960. Some effects of high temperatures on the cones and seeds of jack pine. *Forest Science*, 6: 194-199.

Bégin, Y., Sirois, L., Cournoyer, L. et Frydecki, J. 1998. Analyse dendrochronologique des effets climatiques du réservoir Robert-Bourassa sur l'environnement forestier, Québec nordique. Centre d'études nordiques, Université Laval. 174 p.

Bergeron, Y. 1998. Les conséquences des changements climatiques sur la fréquence des feux et la composition forestière au sud-ouest de la forêt boréale québécoise. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 52, n° 2, p. 167-174.

Blake, T.J. & Li, J. 2003. Hydraulic adjustment in jack pine and black spruce seedlings under controlled cycles of dehydration and rehydration. *Physiologia plantarum*. 117: 532-539.

- Boulet, B. 1984. Stratégies d'échantillonnage établies pour la détection et la surveillance des insectes en milieu forestier. *Revue d'entomologie du Québec*. Vol. 29, No. 2:101-113.
- Bunn, A., Korpela, M., *et al.* 2007. R package : dplR.  
<http://cran.r-project.org/web/packages/dplR/index.html>.
- Burns, R.M. & Honkala, B.H. 1990. *Silvics of North America: 1. Conifers*. Agriculture Handbook. 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC. 675p.
- Caron, G. E. & G. R. Powell. 1989. Patterns of seed-cone and pollen-cone production in young *Picea mariana* trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 19: 359-364.
- Cameron, H. 1953. Melting point of bounding material in lodgepole and jack pine cone. Dept. of Northern Affairs and Natural Resources, Silvicult. Leaflet. 86, Ottawa.
- Cayford, J. H. & McRae, D. J. 1983. The ecological role of fire in jack pine forests. In: Wein, Ross W.; MacLean, David A., eds. *The role of fire in northern circumpolar ecosystems*. Scope 18. New York: John Wiley & Sons: 183-199
- De Groot, W. J., Bothwell, P. M., Carlsson, D. H., & Logan, K. A. 2003. Simulating the effects of future fire regimes on western Canadian boreal forests. *Journal of Vegetation Science*, 14: 355-364.
- Clark, P.U., Dyke, A.S., Shakun, J.D., Carlson, A.E., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J.X., Hostetler, S.W. & McCabe, M. 2009. The Last Glacial Maximum. *Science*, vol.325:p. 710-714.

Climatic Research Unit. 2012. Precipitation data. <http://www.cru.uea.ac.uk/data>. Consulté en 2012.

Climatic Research Unit. 2012. Temperature data. <http://www.cru.uea.ac.uk/data>. Consulté en 2012.

Desponte, M. 1990. Dynamisme récent et holocène du pin gris à sa limite septentrionale de distribution au Nouveau-Québec. Thèse de doctorat. Université Laval, département de phytologie, faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation.

Desponte, M. & Payette, S. 1992. Recent dynamics of jack pine and its northern distribution limit in northern Quebec. *Can. J. Bot.* 70: 1157–1167

Desponte, M. & Payette, S. 1993. The Holocene Dynamics of Jack Pine at Its Northern Range Limit in Quebec. *Journal of Ecology*, Vol. 81, No. 4, pp. 719-727

Dignard, N. 2006. La situation du pin rigide (*Pinus rigida* Miller) au Québec. Herbarium du Québec, Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, rapport préparé pour le Centre de données sur le patrimoine naturel du Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. 25 p.

Édelin, C. 1977. Images de l'architecture des conifères. Thèse de Doctorat. Montpellier (FRA), USTL, Sciences Biologiques; mention Biologie Végétale. 255p.

Environnement Canada, 2013. Archives climatiques nationales du Canada. <http://climat.meteo.gc.ca>. Consulté en 2012.

Fritts, H. C., Blasing, T. J., Haydn, B. P. & Kutzbach, J.E. 1971. Multivariate techniques for specifying tree-growth and climate relationships and for reconstructing anomalies in paleoclimate. *Journal of Applied Meteorology*, 10: 845-864.

Fritts, H. C. 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press, London, 567 p.

GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse. 103 pages.

GIEC, 2013: Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Résumé à l'intention des décideurs.

Grenon, F. 1998. Relation entre la présence du nodulier du pin gris (*Petrova albicapitana*) et les diminutions de la croissance du pin gris (*Pinus banksiana*). Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Chicoutimi.

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

Guiot, J. et Nicault, A, 2010. Méthode de dendroclimatologie à l'échelle continentale : fonctions de réponse et fonctions de transfert. Principes, méthodes et applications, la dendrochronologie, sous la direction de Serge Payette et Louise Filion. Presses de l'Université Laval. Chapitre 8: 199–227.

- Halle, F. et Oldeman, R.A.A. 1970. Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. Monographie de Botanique et de Biologie Végétale. Éditions Masson, Paris. 176p.
- Hammond, H., 1994. The boreal forest: options for ecologically responsible human use. Yukon Conservation Society. Silva Ecosystem Consultants Ltd., 1-27.
- Hardy, Léon. 1976. «Contribution à l'étude géomorphologique de la portion québécoise des basses terres de la Baie James». Thèse de doctorat, Montréal, Université McGill, 264p.
- Hardy, Léon. 1977. «La déglaciation et les épisodes lacustres et marins sur le versant québécois des basses terres de la Baie de James». *Géographie Physique et Quaternaire*, vol. 31, no 3-4, p. 261-273.
- Héon, J. 2010. Chevauchement des feux dans la taïga du Québec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec.
- Holmes, R.L. 1992. Dendrochronology program library, instruction and program manual (January 1992 update). Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson.
- Hofgaard, A., Tardif, J & Bergeron, Y. 1999. Dendroclimatic response of *Picea Mariana* and *Pinus Banksiana* along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 29: pp. 1333-1346
- Howse, G.M. 1984. Insect pests of jack pine: biology, damage and control. Ministry of Natural Resources of Ontario, Jack Pine Symposium, Proceedings O-P-12: 131-138.

- Huang, J., Tardif, J.C., Bergeron, Y., Denneler, B., Berninger, F. & Girardins, M.P. 2010. Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Global Change Biology*; 16, pp. 711-731.
- Institut de recherche d'Hydro-Québec. 2010. Données neige; krigeage développé pour la province de Québec et certaines parties voisines à l'aide d'un jeu de données obtenus auprès d'Environnement Canada, du gouvernement provincial du Québec et d'agences privées. Wackernagel, 1998 ; Tapsoba et al, 2005 et Jeannée et Tapsoba, 2010).
- Johnson, E.A. 1992. Fire and vegetation dynamics-studies from the North American boreal forest. Cambridge Studies in Ecology, Cambridge University Press.
- Le Goff, H. & Sirois, L. 2004. Black spruce and jack pine dynamics simulated under varying fire cycles in the northern boreal forest of Quebec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 34: 2399-2409.
- Longpré, M.H., Bergeron, Y., Paré, D. & Béland, M. 1994. Effect of companion species on the growth of jack pine (*Pinus banksiana*). *Can. J. For. Res.* 24: 1846-1853.
- Kaplan, M.R., Schaefer, J.M., Denton, G.H., Barrell, D.J.A., Chinn, T.J.H., Putnam, A.E., Andersen, B.G., Finkel, R.C., Schwartz, R. & Doughty, A.M. 2010. Glacier retreat in New Zealand during the Younger Dryas stadial. *Nature*, vol. 467:p. 194-197.
- Marshall, J.G., Rutledge, R.G., Blumwald, E. & Dumbroff, E.B. 2000. Reduction in turgid water volume in jack pine, white spruce and black spruce in response to drought and paclobutrazol. *Tree physiology*. 20, 701-707.

Martineau, R. 1984. Insectes nuisibles des forêts de l'est du Canada. Éditions Marcel Broquet inc., LaPrairie, p. 70-72.

Ministère des Ressources naturelles Québec. 2013.

<http://www.mrn.gouv.qc.ca/accueil.jsp/>

<http://www.mrn.gouv.qc.ca/echo-foret/2003-05/savoir/savoir-insectes-principaux-galligenes.jsp>. Consulté en ligne le 29-10-13.

Ministère des Ressources naturelles Québec. 2013.

<http://www.mrn.gouv.qc.ca/accueil.jsp/>

<http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/fimaq/insectes/fimaq-insectes-insectes-diprionides.jsp>. Consulté en ligne le 29-10-13.

Ministère des Ressources naturelles Québec, OIFQ. Dictionnaire de la foresterie, 2003.

<http://www.apbb.qc.ca/FichiersUpload/Softsystem/20110921-111500-age-2.pdf>.

Consulté en ligne le 14-02-2013

National Geographic Magazine, oct. 2007, d'après les données du Climatic Research

Unit, University of East Anglia (CRU) [www.ngm.com/climateconnections](http://www.ngm.com/climateconnections).

Consulté en ligne le 12-11-2012.

Nicault, A., Bégin, Y. & Guiot, J., 2010. La standardisation des séries dendrochronologiques. Principes, méthodes et applications, la dendrochronologie, sous la direction de Serge Payette et Louise Filion. Presses de l'Université Laval. Chapitre 8: 199–227.

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

- Parisien, M.A., Sirois, L. & Babeau, M. 2004. Distribution and dynamics of jack pine at its longitudinal range limits in Québec. Pages 247–257 in R.T. Engstrom, K.E.M. Galley, and W.J. de Groot (eds.). Proceedings of the 22nd Tall Timbers Fire Ecology Conference: Fire in Temperate, Boreal, and Montane Ecosystems. Tall Timbers Research Station, Tallahassee, FL.
- Payette, S., Fillion, L. *et al.* 2010. Dendroécologie : principes, méthodes et applications. Presses de l'Université Laval. 758 p.
- Payette, S., Morneau, C., Sirois, L. & Despons, M. 1989. Recent fire history of the northern Québec Biomes. *Ecology*, 70 (3): 656-673.
- R Development Core Team (2008). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Ressources naturelles Canada. 2013. [www.rncan.gc.ca/](http://www.rncan.gc.ca/)  
<http://aimfc.rncan.gc.ca/insectes/fiche/6585>. Consulté en ligne le 29-10-13.
- Ressources naturelles Canada. 2013. [www.rncan.gc.ca/](http://www.rncan.gc.ca/)  
<http://aimfc.rncan.gc.ca/insectes/fiche/12024>. Consulté en ligne le 29-10-13.
- Ressources naturelles Canada. 2013. [www.rncan.gc.ca/](http://www.rncan.gc.ca/)  
<https://aimfc.rncan.gc.ca/fr/arbres/identification/coniferes/3/Pinus>. Consulté en ligne le 23-03-13.
- Ressources naturelles Canada. 2013. [www.rncan.gc.ca/](http://www.rncan.gc.ca/)  
<http://www.rncan.gc.ca/forets/boreale/13072>. Consulté en ligne le 22-02-13.

- Rousseau, C. 1974. Géographie floristique du Québec/Labrador. Distribution des principales espèces vasculaires. Québec. Les Presses de l'Université Laval. Travaux et documents du centre d'études nordiques, 978 pages.
- Rudolph, T. D., Laidly, P. R. 1990. *Pinus banksiana* Lamb, jack pine. In: Burns, Russell M.; Honkala, Barbara H., technical coordinators. *Silvics of North America*. Volume 1. Conifers. Agric. Handb. 654. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service: 280-293.
- Skinner, R. G. 1973. Quaternary stratigraphy of the Moose River basin, Ontario, Geol. Surv. Can., Bull. 225, 77 p.
- Schweingruber, F.H. 1988. *Tree Rings: Basics and Applications of Dendrochronology*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht. Novanet: Dalhousie Killam Library QK 477.2 A6 S3913 1988 SCI.
- Wein, R.W., MacLean, D.A., 1983. *The role of fire in northern circumpolar ecosystems*. John Wiley and Sons Ltd, New York.

