

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN

RESSOURCES RENOUVELABLES

PAR

MARIE-NOËLLE FORTIN

B. Sc. Biologie

ÉTUDE DESCRIPTIVE DES RELATIONS DE CROISSANCE ENTRE LA TIGE, LA
RACINE PIVOTANTE ET LES RACINES HORIZONTALES CHEZ LE PIN GRIS
(*Pinus banksiana*) DANS LA RÉGION DU LAC SAINT-JEAN, QUÉBEC.

JUIN 2004



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

Le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) est une espèce boréale réputée pour sa bonne croissance sur les sols graveleux peu fertiles et relativement secs. Cependant, des observations récentes faites dans le secteur de la rivière Nestaocano, au nord du lac Saint-Jean, ont montré que les pins gris s'y trouvant présentent des taux de croissance faibles. Une étude descriptive détaillée de la croissance des tiges, des racines pivotantes et des racines horizontales de 5 pins gris provenant de ce secteur a été faite afin de tenter de trouver les causes de ces faibles taux de croissance. L'objectif principal de cette étude est donc de décrire les relations entre la croissance de la tige, de la racine pivotante et d'une racine horizontale chez les pins gris et d'analyser le ralentissement dans la croissance radiale de ces derniers. Les tiges et les systèmes racinaires des 5 pins gris ont été coupés et soumis à une analyse dendrochronologique. En général, les chronologies de la tige, de la racine pivotante et de la racine horizontale présentent un très bon synchronisme pour chaque pin gris, et d'un arbre à l'autre également. Les coefficients de corrélation calculés entre les chronologies de la tige, de la racine pivotante et de la racine horizontale d'un même individu indiquent que la meilleure concordance se trouve entre la racine pivotante et la racine horizontale (coefficients de 0,59 à 0,93) alors que la plus faible est entre la tige et la racine horizontale (coefficients de 0,02 à 0,55). Le profil longitudinal d'accroissement radial cumulé des tiges suit la forme classique de croissance décrite dans la littérature. Celui de chaque racine pivotante est inversé et condensé par rapport au profil de la tige s'y associant. Les profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé des racines horizontales montrent une grande variabilité. De plus, ces profils montrent que la croissance en longueur des racines horizontales est très rapide au cours de la première décennie. Des réductions de croissance radiale significatives (plus de 40% de réduction) ont été observées dans les 5 arbres. Deux pins gris montraient une diminution de croissance radiale plus intense que les autres dans les trois parties de l'arbre, avec une diminution intense au cours des deux dernières décennies et des taux de réduction de croissance de 70% à 100% pour la dernière année avant la récolte. En général, les réductions de croissance observées dans les tiges se répercutent dans les racines pivotantes et horizontales. Trois diminutions de croissance synchrones sont observées dans les tiges, les racines pivotantes et les racines horizontales des 5 pins gris, soit de 1960 à 1962, de 1980 à 1982 et de 1988 à 1990. La comparaison du patron de croissance radiale annuelle moyenne des tiges des pins gris du secteur de la rivière Nestaocano avec celui de pins gris affectés par le nodulier du pin gris (*Petrova albicapitana*) dans le secteur Vauvert sur la Pointe Racine montre que des diminutions de croissance radiale synchrones se produisent en 1962, en 1984 et en 1990 dans les deux secteurs. Il semble donc que le nodulier du pin gris joue un rôle dans le ralentissement de la croissance des pins gris du secteur de Nestaocano, et que l'impact de ce dernier s'étende sur une grande superficie. Toutefois, la croissance plutôt lente lors de la phase juvénile des pins gris dans cette étude laisse supposer que d'autres facteurs pourraient également être à l'origine du ralentissement dans leur croissance radiale.

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans l'aide de mes directeurs de maîtrise, M. Réjean Gagnon et Mme Cornelia Krause, qui m'ont conseillé et encouragé tout au long de la réalisation de ce projet. Je tiens à remercier Germain Savard pour sa générosité, sa patience et pour l'aide inestimable qu'il m'a accordé lors de l'échantillonnage sur le terrain et au laboratoire. Un gros merci à Julie Valcourt et François Gionest pour leur expertise et leur enthousiasme lors de l'échantillonnage.

Je remercie Mme Linda Grenon pour le soutien moral et administratif qu'elle m'a fourni. Merci au personnel et aux étudiants du laboratoire d'écologie végétale, ainsi qu'au Consortium de Recherche sur la forêt boréale commerciale pour l'appui financier qu'il m'a accordé afin de mener ce projet à terme.

Merci à ma famille, ainsi qu'à mes anges-gardiens précieux, Sabin, Marie-Hélène et Guillaume, pour leur support moral constant, leur compréhension et la confiance qu'ils ont en moi. J'aimerais finalement remercier sincèrement mes merveilleux amis(es) qui m'ont aidé, motivé et inspiré au cours de ce long périple...

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES ANNEXES	xi
CHAPITRE 1. INTRODUCTION.....	1
1.1. Introduction	2
CHAPITRE 2. MÉTHODOLOGIE.....	8
2.1. Aire d'étude.....	9
2.2. Description du site d'échantillonnage	10
2.3. Échantillonnage	11
2.4. Mesures des échantillons.....	13
2.4.1. Mesure des cernes de croissance.....	14
2.5. Traitement des données	15
2.5.1. Interdatation	15
2.5.2. Standardisation des données	17

2.5.3. Corrélation entre la tige, la racine pivotante et la racine horizontale.....	18
2.5.4. Réductions de croissance significatives.....	18
2.5.5. Profils longitudinaux d'accroissement radial.....	19
CHAPITRE 3. RÉSULTATS	21
3.1. Patrons de croissance.....	22
3.1.1. Courbe moyenne des tiges	22
3.1.2. Croissance des tiges et des racines.....	23
3.2. Corrélations tige/racine pivotante/racine horizontale.....	30
3.3. Profils longitudinaux d'accroissement radial	33
3.3.1. Profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé	36
3.4. Comparaisons des réductions de croissance entre la tige, la racine pivotante et la racine horizontale	43
3.5. Racines horizontales.....	48
3.5.1. Niveau d'insertion des racines horizontales	48
3.5.2. Diminutions de croissance dans les racines horizontales	49
3.6. Cernes discontinus ou absents.....	51
CHAPITRE 4. DISCUSSION	53
4.1. Relations entre la croissance de la tige, de la racine pivotante et d'une racine horizontale	54

4.1.1. Comparaison entre la croissance de la tige, de la racine pivotante et d'une racine horizontale	54
4.1.2. Racines horizontales	58
4.1.3. Relation entre le niveau du sol et la position du collet	58
4.2. Description de la croissance radiale d'après un profil longitudinal	60
4.2.1. Réductions significatives de croissance radiale	64
4.3. Comparaison du patron de croissance des tiges de cette étude avec celui de Grenon (1997)	65
4.3.1. Potentiel de reprise de croissance	67
CHAPITRE 5. CONCLUSION	70
BIBLIOGRAPHIE.....	72

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation du site étudié.....	9
Figure 2. Photographie du peuplement de pins gris.....	11
Figure 3. Photographie montrant un système racinaire de pin gris. Le trait blanc indique l'endroit où les racines latérales étaient coupées.....	13
Figure 4. Largeur des cernes indiquée des 5 tiges de pins gris dans le temps. Trait noir = largeur des cernes indiquée, barres verticales = écarts-types, n = nombre de tiges incluses dans la chronologie.....	23
Figure 5. Largeur des cernes indiquée : a) de la tige, b) de la racine pivotante et c) de la racine horizontale du pin gris P10.....	24
Figure 6. Largeur des cernes indiquée : a) de la tige, b) de la racine pivotante et c) de la racine horizontale du pin gris P13.....	26
Figure 7. Largeur des cernes indiquée : a) de la tige, b) de la racine pivotante et c) de la racine horizontale du pin gris P11.....	27
Figure 8. Largeur des cernes indiquée : a) de la tige, b) de la racine pivotante et c) de la racine horizontale du pin gris P12.....	28
Figure 9. Largeur des cernes indiquée : a) de la tige, b) de la racine pivotante et c) de la racine horizontale du pin gris P1.....	30
Figure 10. Profil longitudinal d'accroissement radial de 1960 à 1969 et de 1990 à 1998 pour le pin gris P1. a) tige; b) racine pivotante. Chaque point sur le graphique représente la moyenne des largeurs de cernes de croissance pour une période de 10 ans, à une hauteur donnée dans la tige et à une profondeur donnée dans la	

racine pivotante. L'échelle de l'axe des « y » change dans le profil de la racine pivotante.....	35
Figure 11. Profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé : a) de la tige, b) de la racine pivotante et c) de la racine horizontale pour le pin gris P1. Chaque courbe du profil représente la largeur moyenne cumulée des cernes pour une période de dix ans. La courbe de gauche correspond aux années 1920 à 1929, et celle de droite aux années 1990 à 1998.	37
Figure 12. Profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé : a) de la tige, b) de la racine pivotante et c) de la racine horizontale du pin gris P10. Chaque courbe du profil représente la largeur moyenne cumulé des cernes pour une période de dix ans.....	40
Figure 13. Pourcentages de réduction de croissance : a) dans la tige, b) dans la racine pivotante et c) dans la racine horizontale du pin gris P1 de 1960 à 1998. Une réduction supérieure à 40% est considérée significative (Schweingruber 1986). La croissance de 1981 à 1998 est comparée avec celle de 1940 à 1980. L'année 1981 correspond à l'année de l'impact.....	44
Figure 14. Pourcentages de réduction de croissance : a) dans la tige, b) dans la racine pivotante et c) dans la racine horizontale du pin gris P10 de 1960 à 1999.	45
Figure 15. Pourcentages de réduction de croissance : a) dans la tige, b) dans la racine pivotante et c) dans la racine horizontale du pin gris P11 de 1960 à 1999.	47
Figure 16. Schéma du point d'insertion d'une racine horizontale dans la racine pivotante. 48	

Figure 17. Réductions abruptes de la croissance radiale le long de chacune des cinq racines horizontales, à partir de la racine pivotante jusqu'à leur extrémité. 50

Figure 18. Comparaison des courbres de croissance radiale annuelle des tiges de pins gris a) de l'étude de Grenon (1997) ayant un effectif de 17 et b) de cette étude ayant un effectif de 5. Les barres verticales représentent le nombre de cicatrices de nodulier du pin gris à chaque année. Les deux courbes ont été faites à partir de données brutes.65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Coefficients de corrélation entre la tige, la racine pivotante et la racine horizontale pour les pins P1, P10, P11, P12 et P13 et coefficients de corrélation des moyennes de chaque partie (Moyenne.).....	31
Tableau 2. Coefficients de corrélation entre les cinq tiges, les cinq racines pivotantes et les cinq racines horizontales des pins gris P1, P10, P11, P12 et P13.	32
Tableau 3. Coefficients de corrélation entre les ramifications et la tige, la racine pivotante et la racine horizontale dans les pins gris P1, P10, P11, P12 et P13.....	33

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1. Profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé des pins gris P11, P12 et P13	79
ANNEXE 2. Histogrammes des pins gris P12 et P13	83
ANNEXE 3. Données de température	86
ANNEXE 4. Données de précipitations	88

CHAPITRE 1
INTRODUCTION

1.1. INTRODUCTION

Le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.[syn. : *P. divaricata* (Ait.) Dumont.]) compte parmi les espèces commerciales importantes de l'industrie forestière au Canada (Law et Valade 1994; Cayford 1997). Son aire de distribution mondiale se limite à l'Amérique du Nord et c'est l'espèce de pin qui a l'aire de répartition la plus vaste au Canada (Farrar 1995).

Le pin gris est une espèce pionnière et est reconnu comme une essence de lumière (Farrar 1995). Il croît sur des sols plus secs et moins fertiles que les sols où croissent les autres espèces indigènes du Canada se trouvant dans la même aire de distribution que lui (Burns et Honkala 1990). Le pin gris est un arbre qui atteint en moyenne 20 m de hauteur, 30 cm de diamètre et peut vivre généralement jusqu'à environ 150 ans (Farrar 1995). Il est souvent en peuplement pur ou associé à d'autres essences comme l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.), le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.), le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.), le pin rouge (*Pinus resinosa* Ait.) et le mélèze laricin (*Larix laricina* (DuRoi) K. Koch.) (Farrar 1995). Le système racinaire du pin gris est composé de racines latérales très étalées et d'une racine pivotante pouvant s'enfoncer dans le sol jusqu'à 2 m de profondeur. La fonction principale de cette dernière est d'ancre l'arbre dans le sol (Bannan 1940; Strong et La Roi 1983).

La particularité de cette espèce est la présence de cônes sérotineux qui ne s'ouvrent que sous l'action de la chaleur intense dégagée par un feu de forêt ou parfois lors d'une exposition directe au soleil pendant une journée chaude (Farrar 1995). C'est à ces occasions que les graines sont dispersées. Le pin gris dépend donc des feux de forêt pour se régénérer (Cayford 1997).

Le pin gris est reconnu pour sa bonne croissance en général, même qu'il utilise les ressources de l'habitat d'une façon plus efficace que le bouleau, le tremble ou le sapin baumier lorsqu'il vit dans les mêmes conditions que ces derniers (Lafond 1966). Cependant, des forestiers ont mentionné que plusieurs peuplements naturels de pin gris présentaient un faible taux de croissance dans des secteurs au nord du Lac Saint-Jean. Cette observation a amené des chercheurs de l'Université du Québec à Chicoutimi à étudier le phénomène. Une étude menée dans le secteur de la rivière Nestaocano a montré que des périodes de fortes réductions de croissance persistaient chez ces pins gris depuis une trentaine d'années et que pour la plupart, une réduction de croissance marquée se produisait autour des années 1950 à 1960 (Levasseur *et al.* 1999a). De plus, une autre étude effectuée dans le même secteur suggère que les périodes de ralentissement dans la croissance des pins gris serait particulier à cette espèce et ne serait pas observé chez l'épinette noire (Levasseur *et al.* 1999b).

Il a été mentionné que la qualité des sites ne serait pas responsable du ralentissement de la croissance des pins gris du secteur de la rivière Nestaocano (Levasseur *et al.* 1999b). Le taux d'humidité dans le sol n'affecterait pas non plus les pins gris puisque

certains individus se trouvant sur des sites au sol humide n'avaient pas une meilleure croissance que les pins gris des autres sites plus secs. Une des conclusions faites dans cette étude est donc que les causes de ce ralentissement restent méconnues. Il a toutefois été mentionné dans une autre étude que certains pins gris de ce secteur montraient des traces du nodulier du pin gris (*Petrova albicapitana* Busck.) (Levasseur *et al.* 2001). Le nodulier du pin gris est un insecte s'attaquant entre autre au pin gris en annelant les rameaux, les branches et la flèche terminale de ceux-ci (Martineau 1984). Dans la région de Pointe-Racine, située au nord du Lac Saint-Jean, Grenon (1997) a mis en évidence la relation entre l'abondance du nodulier du pin gris et la diminution de croissance en hauteur et en diamètre dans les pins gris de ce secteur, malgré que cet insecte cause rarement la mort des arbres.

Parmi les autres insectes ravageurs du pin gris au Québec, le diprion de Swaine (*Neodiprion swainei* Midd.), un insecte défoliateur, est un de ceux ayant causé le plus de ravages dans les peuplements de pin gris (Caron 1990). Lorsque le vieux feuillage est disparu et que la défoliation s'étend sur le nouveau feuillage, les arbres meurent inévitablement (Martineau 1984). Cependant, selon un relevé de 1995 (Anonyme 1995), il semble que les populations de cet insecte aient régressé dans le secteur du Saguenay-Lac-Saint-Jean et que l'infestation localisée au nord de cette région ait continué à se résorber.

Peu d'études traitent de l'impact du nodulier du pin gris sur la croissance des arbres. Ainsi, un parallèle entre l'annellement des rameaux dû au nodulier du pin gris et la défoliation par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* (Clem.)) peut être utile pour obtenir des pistes de recherche quant à l'impact du nodulier du pin gris

sur les arbres. En effet, plusieurs études dendrochronologiques traitent des impacts de la défoliation causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) sur les tiges de sapin baumier et d'épinette noire (Mott *et al.* 1957; Blais 1958; MacLean 1981; Morin et Laprise 1990). La TBE cause la mort des sapins et des épinettes par la défoliation et cause des dommages importants au Québec (Borror et White 1991). Jusqu'à maintenant, l'impact de la défoliation par la TBE a principalement été étudié dans les tiges et peu d'études portent sur l'impact d'une défoliation sur la croissance radiale du système racinaire des arbres (Krause et Morin 1995a).

L'originalité de ce travail réside dans le fait que l'impact du nodulier du pin gris sera étudié non seulement dans les tiges des pins gris, mais dans les racines également. Selon Fayle (1974), le développement et la croissance d'un arbre doivent être considérés autant dans les parties aériennes que dans celles sous le sol. L'importance des racines est considérable puisque leur croissance est nécessaire à la croissance des autres structures qui composent un arbre (Hardy, 1998). Cette étude vise donc, en partie, à analyser les réponses des racines lignifiées face au ralentissement de croissance observé chez les pins gris dans le secteur de la rivière Nestaocano.

La morphologie et la physiologie du système racinaire du pin gris ont été décrites dans quelques études (Bannan 1940, 1942; Strong et La Roi 1983), mais peu d'analyses dendrochronologiques ont été faites dans les racines en général (Schulman 1945; Fayle 1975b; Krause et Morin 1998-1999). La rareté de ce genre d'étude vient sans doute du fait que l'interdatation dans les racines demande beaucoup plus de temps que celle effectuée à

partir de sections dans les tiges, qui sont plus facilement accessibles (Krause et Eckstein 1993). Quelques chercheurs ont étudié la croissance radiale des racines, notamment Schulman (1946), Fayle (1975b), Krause et Eckstein (1993), Hardy (1998) et Krause et Morin (1995a, 1995b, 1998-1999), mais à notre connaissance, les racines du pin gris n'ont pas encore été soumises à des analyses dendrochronologiques.

Un autre volet sera traité dans cette étude, en ce qui concerne l'absence de racines adventives chez le pin gris (Bannan 1942; Sutton 1980). Ces dernières sont considérées comme un mécanisme de réparation des systèmes racinaires ayant subit un dommage suite à un stress quelconque (Sutton 1980). Krause et Fournier (1996) ont observé que chez le sapin baumier, le système racinaire des individus ayant survécu à des épidémies de la TBE était constitué exclusivement de racines adventives. Le pin gris n'ayant pas cette capacité, il est important de se questionner quant à son potentiel de reprise de croissance après avoir été soumis à des conditions défavorables telles des épidémies.

L'objectif général de cette étude est d'établir, par une analyse dendrochronologique, des relations entre la croissance de la tige, de la racine pivotante et des racines horizontales chez le pin gris. Les buts spécifiques sont d'analyser le synchronisme et les différences dans la croissance de la tige, de la racine pivotante et des racines horizontales, de caractériser la réduction de la croissance des pins gris en comparant son patron avec celui des pins gris étudiés par Grenon (1997) et, finalement, d'évaluer le potentiel de reprise de croissance chez le pin gris.

Considérant que des études antérieures ont démontré qu'il y avait une réduction dans la croissance des pins gris dans le secteur de la rivière Nestaocano (Levasseur *et al.* 1999a, 1999b, 2001) et que le nodulier du pin gris peut réduire la croissance en hauteur et en diamètre des pins gris (Grenon 1997), il est posé comme hypothèse de recherche que le ralentissement dans la croissance observé chez le pin gris dans le secteur de la rivière Nestaocano serait relié à la présence du nodulier du pin gris. Le patron des diminutions de croissance des pins gris étudiés devrait donc être synchrone avec celui des pins gris analysés par Grenon (1997). Il est également supposé que les réductions de croissance observées dans les tiges des pins gris seront également visibles dans les racines pivotantes et horizontales.

CHAPITRE 2
MÉTHODOLOGIE

2.1. AIRE D'ÉTUDE

La région d'étude se situe au nord du Lac Saint-Jean, dans les plaines fluvio-glaciaires de la rivière Nestaocano, soit à $49^{\circ}53'46.5''$ de latitude nord et $73^{\circ}17'11.9''$ de longitude ouest (Figure 1). Ce territoire fait partie de la zone de la forêt boréale, dans le domaine de la pessière à mousses de l'ouest se trouvant sur un dépôt fluvio-glaciaire à texture grossière, et dont le milieu physique est de type xérique (Saucier *et al.* 1998).

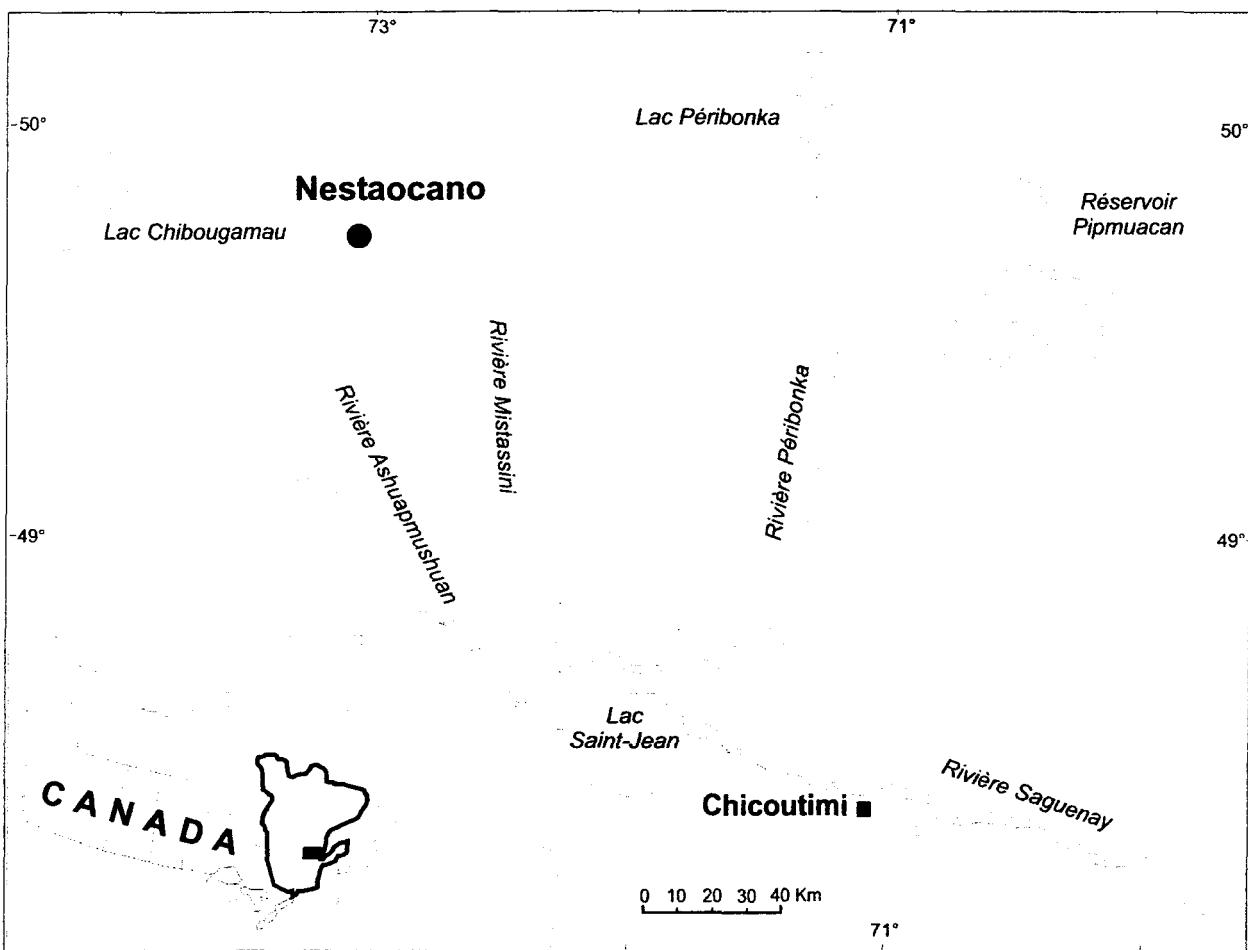


Figure 1. Localisation du site étudié (Nestaocano).

2.2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉCHANTILLONNAGE

Le site d'échantillonnage est un peuplement naturel constitué de pins gris issus d'un feu datant d'environ 1920 (Figure 2). L'année du feu a été déterminée à partir de l'âge des pins gris établis. Selon le Ministère des Ressources Naturelles, l'appellation cartographique de ce peuplement est PgPg B3 70, ce qui désigne une pinède grise âgée de 70 ans, ayant de 60 à 80 % de densité de couverture et dont la hauteur des dominants se situe entre 12 et 17 m. Le taux de mortalité des pins gris dans ce site, calculé sur une superficie de 400m², était de 35 %. Le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des tiges variait de 3,0 cm à 20,4 cm avec une moyenne de 9,9 cm.

Le site se trouve sur un dépôt sablonneux et le relief y est relativement plat. La végétation s'y retrouvant est principalement composée de lichens (*Cladina stellaris* et *C. rangiferina*) retrouvés en milieux ouverts et secs, et d'airelles à feuilles étroites (*Vaccinium angustifolium*) (Ministère de l'énergie et des ressources 1990; Ministère des Ressources naturelles 2000). Le sol est de type podzolique (Agriculture Canada 1987). Le climat de cette région (station Chibougamau A: 49°49'N, 74°25'O) se caractérise par une température moyenne annuelle de 1,1°C avec des moyennes mensuelles variant de -20,2°C en janvier à 17,1°C en juillet. La moyenne annuelle pour les précipitations est de 595 mm sous forme de pluie et de 287 mm sous forme de neige (Environnement Canada 2000).



Figure 2. Photographie du peuplement de pins gris.

2.3. ÉCHANTILLONNAGE

Les individus choisis devaient être matures et présenter des réductions de croissance radiale. Au cours d'une étude préliminaire dans le secteur Nestaocano, l'observation de carottes prélevées dans les tiges des pins gris a montré une réduction dans la croissance radiale de ceux-ci. Les 12 et 13 octobre 1999, cinq arbres parmi les dominants et les co-dominants à l'intérieur d'un quadrat de 20 x 20 m (400 m²) ont été abattus à la base de leur tige. Les codes P1, P10, P11, P12 et P13 leur ont été donnés et représentent chacun des pins gris. Des sections transversales de 3 cm d'épaisseur ont été prises au niveau du sol, puis à 30 cm, 60 cm, 1 m, 1,3 m, 2 m et à tous les mètres

subsequents jusqu'à la cime de la tige. La présence du nodulier du pin gris a été vérifiée et notée pour chacun des arbres.

Les systèmes racinaires ont été excavés manuellement à l'aide de pelles et de truelles (Figure 3). Un schéma du système racinaire a été dessiné sur le terrain afin d'avoir la position cardinale des racines et de leurs ramifications. Les racines latérales (incluant les racines horizontales) ont été excavées jusqu'à un diamètre d'environ 2 cm (Krause et Morin 1995b) et dans plusieurs cas jusqu'à un diamètre de 1cm. Ensuite, elles ont été numérotées et coupées le plus près possible de la racine pivotante afin de faciliter le transport jusqu'au laboratoire. Un numéro a été attribué à chaque racine latérale et a été inscrit à son point d'insertion sur la racine pivotante afin de retrouver son emplacement sur celle-ci une fois les racines coupées. Les cinq systèmes racinaires ont été ramenés au laboratoire et des schémas ainsi que des photos ont été pris.

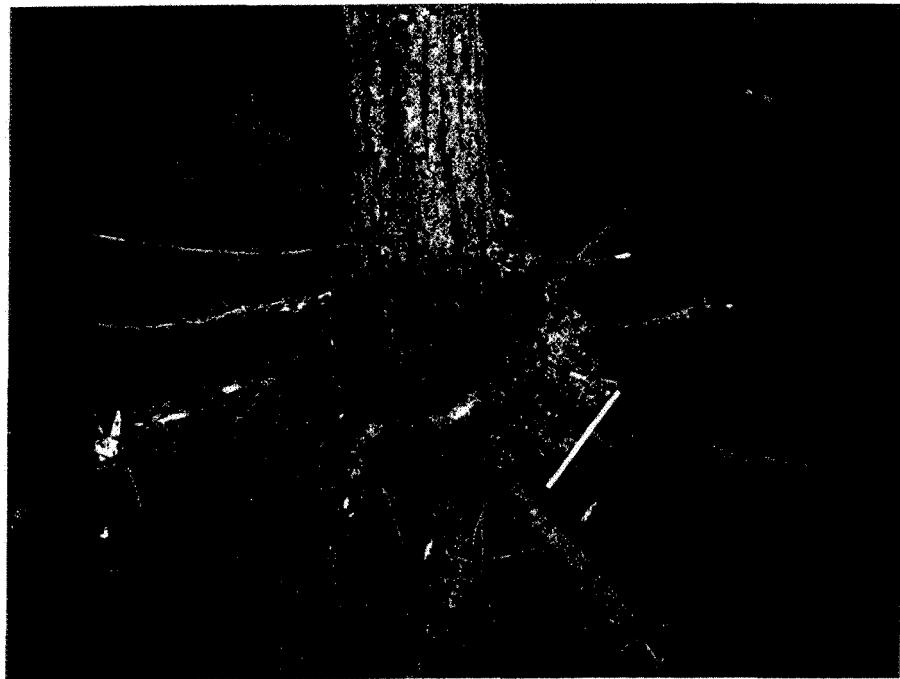


Figure 3. Photographie montrant un système racinaire de pin gris. Le trait blanc indique l'endroit où les racines latérales étaient coupées.

2.4. MESURES DES ÉCHANTILLONS

Avant de mesurer les cernes de croissance sur les sections des racines, le système racinaire de chaque arbre a été dessiné en détail. Les racines latérales ont été coupées à la jonction de la racine pivotante. Une section transversale a été coupée à tout les 15 cm dans les racines latérales, en commençant à proximité de la racine pivotante. Un dessin des racines coupées a ensuite été fait afin de décrire la position des sections dans chacune des racines (Krause et Morin 1995b). La racine pivotante a été coupée en sections transversales de 2 cm (DesRochers et Gagnon 1997).

Les sections des tiges, des racines pivotantes et des racines latérales ont été séchées et ensuite sablées au papier émeri à grosseur de grains de 80, 220 et 400, successivement.

2.4.1. Mesure des cernes de croissance

Tout les cernes annuels de croissance sur les sections de tiges, de racines pivotantes et de racines latérales ont été mesurés manuellement à l'aide d'un micromètre Henson avec une précision de 0,01mm. Les échantillons présentant des cernes de croissance très étroits étaient préparés en coupant une mince couche sur leur surface à l'aide d'une lame de rasoir, puis en y appliquant de la craie pour faire ressortir les contrastes.

Pour les sections de tige à chaque mètre, les cernes de croissance ont été mesurés sur deux rayons. Sur les sections au niveau du sol (0m), à 30 cm, à 60 cm et à 1 m, les mesures ont été prises sur trois ou quatre rayons puisqu'elles présentaient souvent des cernes partiels ou absents.

Dans les racines pivotantes, le collet, soit la région de transition entre la tige et les racines, a été identifié par coupe anatomique en localisant l'endroit de passage de la moelle au cylindre central vasculaire dans les sections (DesRochers et Gagnon 1997). Les sections au-dessus du collet faisant encore partie de la tige ont uniquement servi à retrouver les cernes repères pour faciliter l'interdatation au niveau des racines, particulièrement lorsqu'il manquait des cernes près de l'écorce. Les mesures dans la racine pivotante étaient faites à

partir de la section au niveau du collet en descendant vers l'extrémité de la racine à tout les 10 cm. Deux rayons ont été mesurés sur la section au collet et un seul rayon a été mesuré pour les sections suivantes dans la racine pivotante.

En raison de la forme excentrique et irrégulière des cernes de croissance dans les racines latérales, les mesures ont été prises sur un seul rayon (Krause et Eckstein 1993; Krause et Morin 1995b). Le rayon ayant le plus grand nombre de cernes était sélectionné (Krause et Eckstein 1993). Ce rayon ne suivait pas toujours une ligne droite puisque la direction de l'excentricité dans les racines est très variable (Krause et Eckstein 1993).

Finalement, les stèles des racines horizontales de chaque système racinaire ont été observées afin de vérifier l'endroit où les racines prenaient naissance dans la racine pivotante.

2.5. TRAITEMENT DES DONNÉES

2.5.1. Interdatation

L'interdatation des données a été effectuée selon la méthode décrite dans Stokes et Smiley (1968) et dans Fritts (1976). L'interdatation a été faite en deux étapes, la première étant visuelle et la deuxième ayant recours au programme Cofecha (Holmes 1983).

Dans la tige et les racines, les courbes des mesures de largeurs de cernes en fonction des années ont été comparées 1) entre les rayons d'une même section, 2) entre les sections d'une même tige ou d'une même racine, puis 3) entre les cinq tiges ou racines

pivotantes afin d'avoir une courbe moyenne finale. Dans le cas des racines latérales, la courbe moyenne finale (étape 3) de chacun des cinq systèmes racinaires était obtenue en comparant les courbes de toutes les racines latérales mesurées dans le système racinaire.

L'interdatation dans la racine pivotante a été faite de façon à ce que la courbe de croissance de la section située au collet soit d'abord comparée avec celle de la section de tige à 0m. Ensuite, la courbe de la section au collet a été comparée avec celle de la section sous-jacente, et ainsi de suite, jusqu'à l'extrémité de la racine pivotante (Krause et Morin 1995b).

En raison de la grande variabilité au sein des patrons de croissance dans les racines latérales, il a été nécessaire d'analyser un nombre élevé de sections afin d'obtenir une interdatation valable (Krause et Morin 1995b, 1998-1999). Les mesures de la section de la racine latérale à proximité de la base de la racine pivotante ont été comparées avec celles de la racine pivotante (Krause et Eckstein 1993). Ensuite, les mesures de la deuxième section de la racine latérale étaient comparées avec celles de la première section, et ainsi de suite, jusqu'à l'extrémité de la racine latérale (Krause et Eckstein 1993; Krause et Morin 1995b, 1998-1999). Cette façon de procéder pour interdater a permis de repérer visuellement les cernes absents ou discontinus (Fritts 1976).

Finalement, les courbes moyennes de la tige, de la racine pivotante et des racines latérales de chaque arbre ont été interdatées entre elles.

Une racine latérale horizontale a été choisie pour chaque pin gris. Cette racine devait être représentative du système racinaire de l'arbre et devait donc compter parmi les racines latérales principales de celui-ci afin de mieux démontrer les similitudes et les différences entre cette partie du pin gris et les deux autres parties analysées (la tige et la racine pivotante).

Ensuite, l'interdatation visuelle des séries de croissance a été vérifiée à l'aide du programme informatique Cofecha (Holmes 1983), qui effectue des calculs de coefficients de corrélation entre les données et identifie celles qui sont moins bien corrélées. Cette analyse a été faite séparément pour la tige, la racine pivotante et la racine horizontale. Cette étape est importante lorsque le nombre d'échantillons est élevé et pour détecter les erreurs qui auraient pu être commises lors de la mesure et de l'interdatation visuelle. Les échantillons ayant des corrélations faibles ont été vérifiés à nouveau et corrigés si nécessaire. Un coefficient de corrélation étant égal ou supérieur à 0,33 (au-dessus du seuil de confiance de 99%) était considéré valable au niveau de l'interdatation des sections de racines (Krause et Morin 1998-1999).

2.5.2. Standardisation des données

Les méthodes de standardisation habituellement utilisées en dendrochronologie permettent d'uniformiser les données afin de faciliter leur comparaison d'un arbre à l'autre en retirant les éléments de différence quant à l'âge et au vécu de chaque individu. Cependant, dans le cas présent, ces méthodes avaient l'inconvénient de masquer la diminution de croissance observée dans les courbes de croissance radiale à partir de 1980.

L'analyse de cette diminution de croissance faisant partie des objectifs de l'étude, la méthode choisie devait faire en sorte que le signal de la diminution de croissance reste visible malgré la standardisation des données. C'est pourquoi les mesures des largeurs de cernes ont été standardisées selon la méthode employée et décrite par Lussier (1996). Chaque mesure de largeur de cerne à une hauteur donnée dans la tige a été divisée par la largeur moyenne des cernes de la section pour toutes les années. La standardisation des données dans la racine pivotante et la racine horizontale a été faite selon le même principe utilisé pour la tige, à l'exception qu'il n'y avait qu'un seul rayon par section au lieu de deux.

2.5.3. Corrélation entre la tige, la racine pivotante et la racine horizontale

Afin de qualifier la corrélation entre les mesures de croissance de la tige, de la racine pivotante et de la racine horizontale d'un pin gris à l'autre, les coefficients de corrélation ont été calculés à l'aide du programme informatique Correlation matrix (Holmes et Cook 1999). Les coefficients de corrélation inférieurs à 0,33 sont considérés faibles dans le cadre de cette étude.

2.5.4. Réductions de croissance significatives

Les taux de réduction de croissance dans les pins gris échantillonnés ont été calculés dans les tiges, les racines pivotantes et les racines horizontales afin de quantifier la réduction de croissance observée à partir de 1980. L'année de l'impact a été fixée à 1981, puisque les courbes de croissance montraient des réductions abruptes principalement à

partir de cette année. L'impact représente l'année où la perturbation a eu lieu (épidémie). Les mesures de largeur de cernes montrant une réduction de croissance, soit celles de 1981 à 1999 (1998 dans le cas de P1), étaient comparées avec les valeurs moyennes des mesures des deux décennies précédant l'année de l'impact, soit de 1940 à 1980, au cours desquelles la croissance est considérée normale. Une réduction dépassant un taux de 40 % pour une ou plusieurs années est considérée comme une réduction abrupte significative dans la croissance des conifères (Schweingruber 1986).

2.5.5. Profils longitudinaux d'accroissement radial

Afin de visualiser l'évolution de la croissance dans la tige, des profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé ont été faits à partir des mesures des largeurs de cernes. Ces profils sont surtout utilisés pour représenter l'allocation en carbone fournie aux diverses parties de la tige pour former la croissance radiale annuelle (LeBlanc *et al.* 1987). Dans le cas présent, l'allocation en carbone est représentée sur des périodes de dix ans et non sur une base annuelle. Les mesures de largeurs de cernes ont été regroupées pour obtenir des moyennes pour chaque décennie. Ainsi, dans un profil longitudinal d'accroissement radial cumulé, chaque point représente la largeur moyenne cumulée des cernes pour une décennie à une hauteur donnée et la distance entre deux points associées à deux décennies consécutives représente l'accroissement radial formé d'une décennie à l'autre. Les profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé fournissent également des renseignements sur l'accroissement en hauteur des pins gris. En effet, la distance séparant

deux points associés à deux décennies consécutives dans l'axe des y (hauteur) correspond à l'accroissement en hauteur de la tige d'une décennie à l'autre.

Ce procédé a également été appliqué aux racines pivotantes et horizontales afin d'observer le cheminement de la croissance dans celles-ci. La croissance de la racine pivotante est considérée en fonction de la profondeur dans le sol alors que celle dans la racine horizontale doit être considérée en fonction de la longueur.

À partir des profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé des racines horizontales, les distances à la racine pivotante auxquelles il y avait une réduction de croissance abrupte ont été calculées et représentées graphiquement. Le diamètre des racines horizontales lors de ces diminutions de croissance a également été observé.

CHAPITRE 3
RÉSULTATS

3.1. PATRONS DE CROISSANCE

La standardisation des mesures de largeur de cernes ont permis d'obtenir des chronologies indicées qui présentent la croissance radiale indicée des arbres à partir de leur année de naissance jusqu'à l'année d'échantillonnage. Les chronologies indicées de la tige, de la racine pivotante et de la racine horizontale de chaque pin gris sont présentées afin de voir les relations et le synchronisme entre ces trois parties.

3.1.1. Courbe moyenne des tiges

La chronologie indicée obtenue à partir des 5 analyses de tiges montre un patron caractérisé par une accélération dans la croissance radiale au cours des six premières années, avec de grandes différences d'un individu à l'autre (Figure 4). Ensuite, une première diminution de croissance débute en 1928 et atteint un minimum en 1936. De 1940 à 1957, la croissance radiale dans les tiges des pins gris a été supérieure à la moyenne. Cependant, à partir de 1958, la croissance radiale diminue drastiquement jusqu'à la coupe des arbres en 1999. Des réductions abruptes dans la croissance radiale sont visibles de 1958 à 1962 et de 1980 à 1982. Cette diminution de croissance est accompagnée par des variations inter-annuelles plus faibles, qui perdurent jusqu'à la récolte des arbres en 1999. Les écarts-types sont plus petits aux alentours des années 1960 et 1970, atteignant une valeur minimale en 1975.

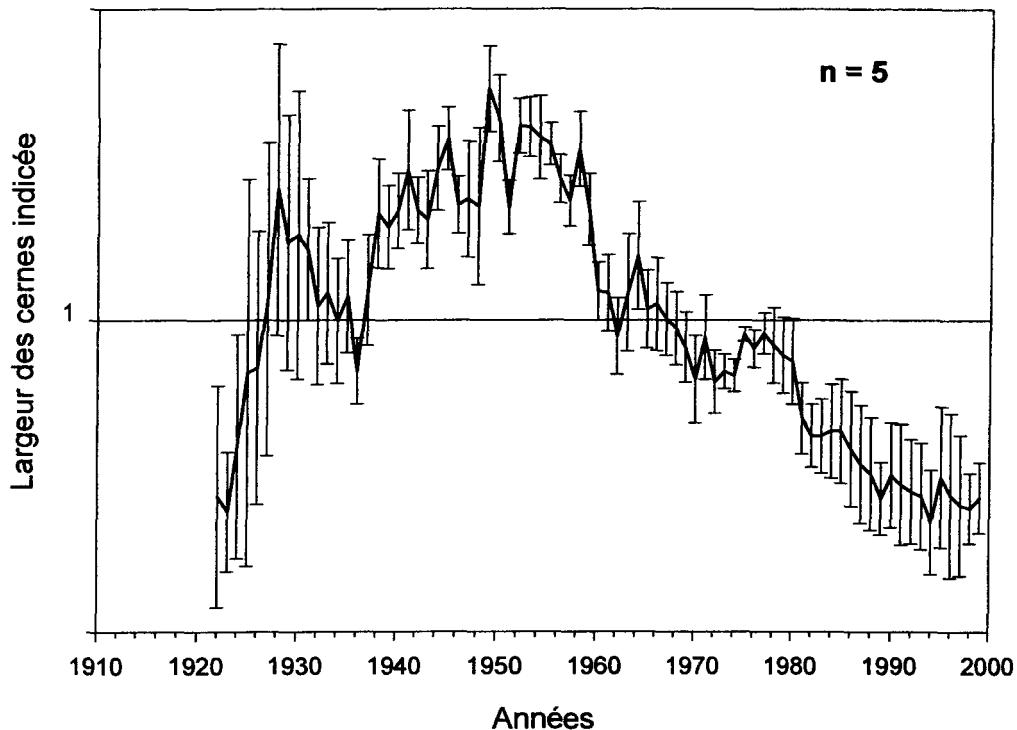


Figure 4. Largeur des cernes indiquée moyenne des 5 tiges de pins gris dans le temps. Trait noir = largeur des cernes indiquée, barres verticales = écarts-types, n = nombre de tiges incluses dans la chronologie.

3.1.2. Croissance des tiges et des racines

La réduction dans la croissance radiale des tiges est prononcée dans les cinq pins gris. De plus, des variations plus grandes que celles vues dans les tiges ont été observées dans les parties souterraines.

Les chronologies indicées du pin gris P10 (Figure 5) permettent de constater que la croissance au cours des quinze premières années est plutôt lente dans la racine pivotante et la racine horizontale comparativement à la croissance dans la tige. Trois tendances dans la croissance de la tige peuvent être observées à partir de 1936. La largeur des cernes

augmente, puis elle reste au-dessus de la moyenne (ligne noire Figure 5) jusqu'en 1960 et ensuite elle diminue. La croissance radiale dans la racine pivotante reste plutôt stable entre 1936 et 1999. Dans la racine horizontale, il est possible de remarquer que la largeur des cernes est plus variable que celles dans la tige et la racine pivotante. La croissance radiale est réduite au cours de trois périodes, soit de 1960 à 1962, de 1980 à 1982 et de 1988 à 1990 et ces trois diminutions de croissance radiale sont synchrones dans les chronologies de la tige, de la racine pivotante et de la racine horizontale.

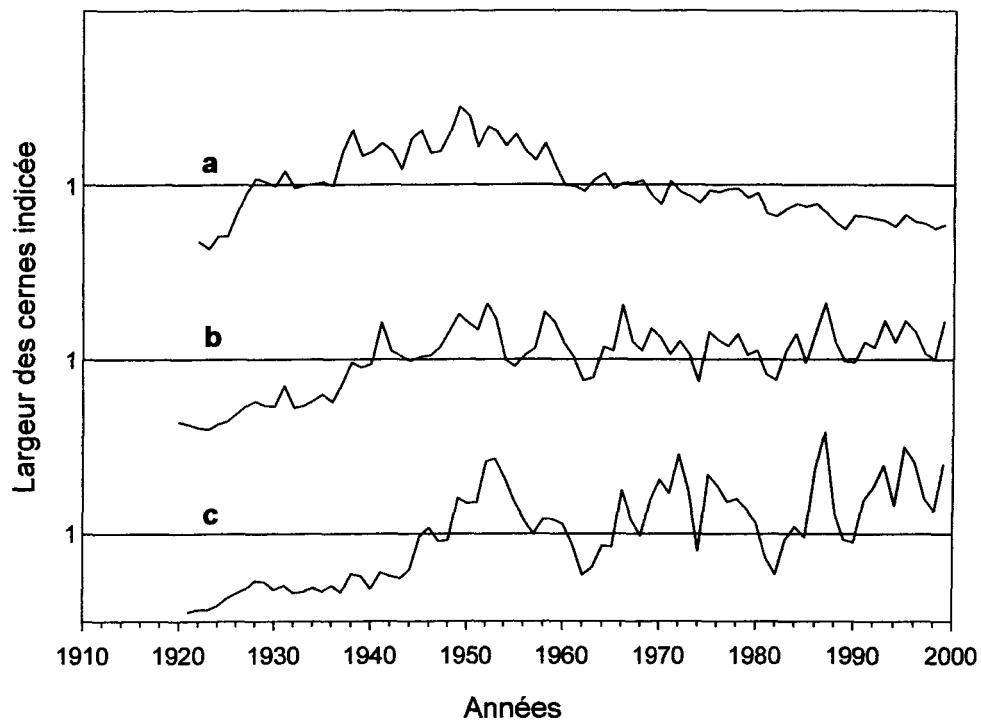


Figure 5. Largeur des cernes indiquée : a) de la tige, b) de la racine pivotante et c) de la racine horizontale du pin gris P10.

Le pin gris P13 montre une croissance radiale suivant les mêmes tendances que la croissance radiale observée pour le pin P10 (Figure 6). La croissance dans les racines pivotante et horizontale du pin P13 est relativement lente au cours des deux premières décennies en comparaison avec la croissance dans la tige. Celle-ci montre une croissance suivant les mêmes tendances que la tige du pin gris P10, soit une augmentation suivie d'une période de bonne croissance, puis une réduction (Figure 6). La racine pivotante a une croissance radiale plutôt stable de 1950 à 1999 alors que dans la racine horizontale, il est possible de voir qu'une diminution de la largeur des cernes se produit lors des deux dernières décennies avant la récolte des arbres. Malgré cette diminution, il semble que la croissance radiale de la racine horizontale subisse une légère augmentation vers 1995. La croissance radiale dans la tige, la racine pivotante et la racine horizontale subit quatre diminutions synchrones se produisant de 1934 à 1936, de 1960 à 1962, de 1980 à 1982 et de 1988 à 1990. Ces réductions sont en général moins visibles dans la tige puisque celle-ci présente des largeurs de cernes moins variables que celles observées dans les racines pivotante et horizontale.

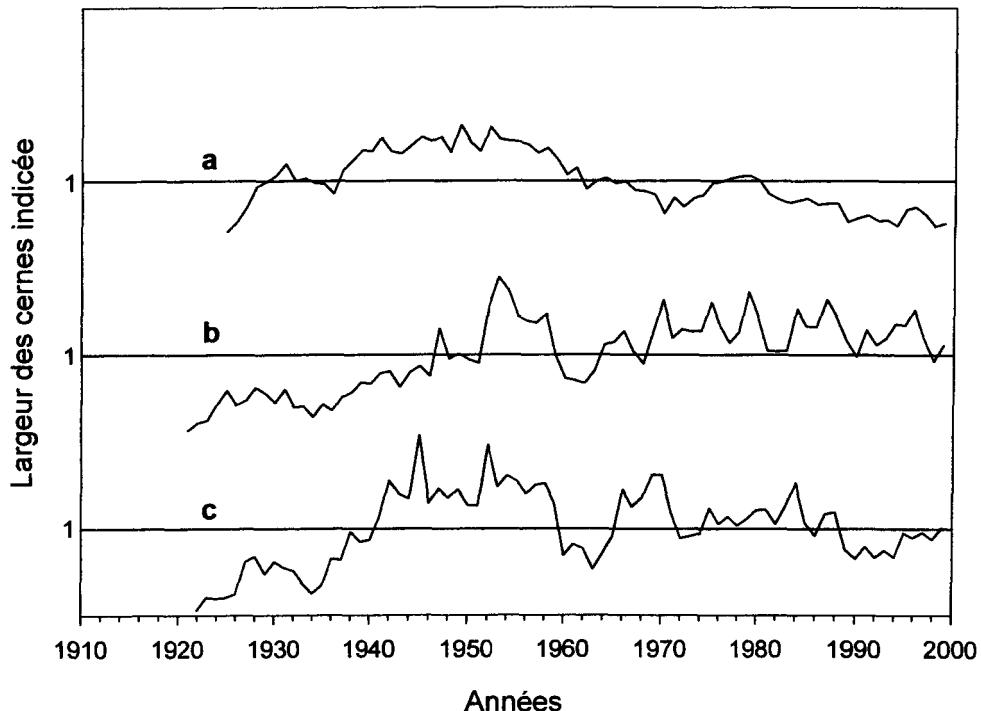


Figure 6. Largeur des cernes indiquée : a) de la tige, b) de la racine pivotante et c) de la racine horizontale du pin gris P13.

La tige du pin gris P11 montre une croissance radiale plutôt semblable à celles des pins gris P10 et P13 avec une croissance relativement bonne, suivie d'une réduction jusqu'à l'année de récolte (Figure 7). Les racines pivotantes et horizontales ont une croissance radiale lente au cours des vingt premières années, puis leur croissance est relativement stable par la suite. Elles subissent une diminution de croissance radiale au cours des deux dernières décennies avant la récolte. De façon générale, la racine horizontale montre une plus grande variation dans la largeur des cernes que la tige et la racine pivotante. Des diminutions de croissance synchrones dans les trois parties de l'arbre se produisent de 1934 à 1936, de 1960 à 1962, de 1980 à 1982 et de 1988 à 1990 comme il a été observé pour le

pin P13. La dernière période de croissance radiale réduite est plus visible dans la racine horizontale que dans la tige et la racine pivotante.

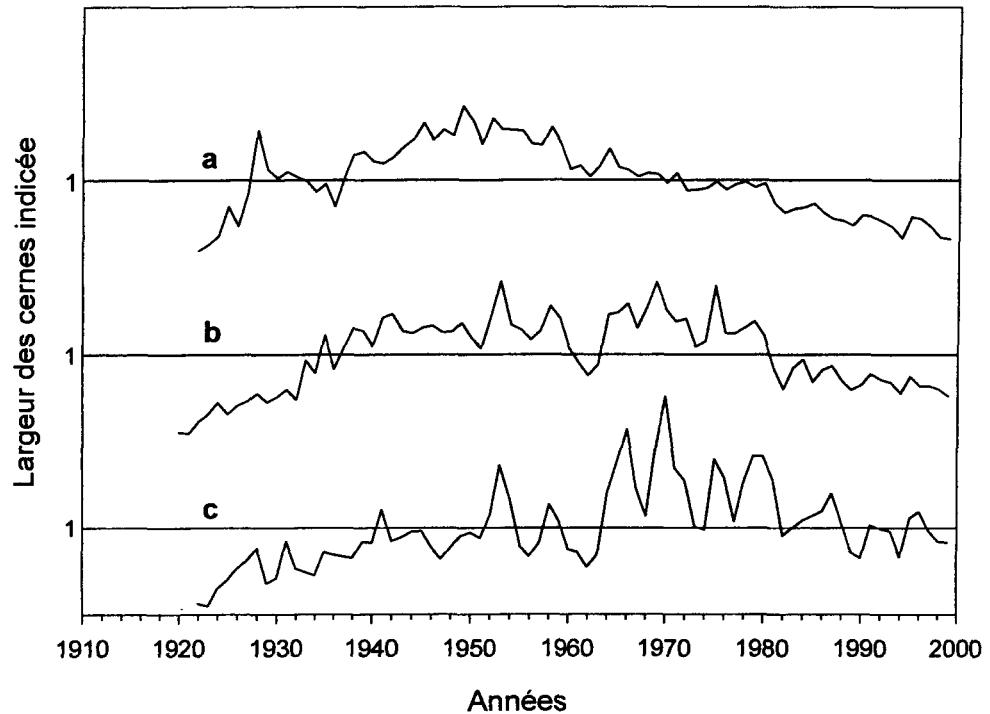


Figure 7. Largeur des cernes indiquée : a) de la tige, b) de la racine pivotante et c) de la racine horizontale du pin gris P11.

La tige du pin gris P12 présente une croissance radiale ressemblant à celle décrite jusqu'à maintenant pour les autres pins (Figure 8). La croissance radiale des racines pivotante et horizontale au cours des quinze premières années est plutôt lente, ce qui suit la tendance observée précédemment dans les racines pivotantes et horizontales des autres pins gris (Figure 8). Par la suite, la croissance dans les racines est relativement stable jusqu'à ce qu'une diminution synchrone se produise en 1972. La racine horizontale présente une très

grande variation dans la largeur des cernes indicée à comparer à celles dans la tige et la racine pivotante. Il y a deux diminutions synchrones dans la croissance radiale de la tige, de la racine pivotante et de la racine horizontale. La première se produit entre les années 1960 et 1962 alors que la deuxième débute en 1980 et perdure jusqu'à l'année de la récolte de l'arbre (1999). La variation dans la largeur des cernes est alors très faible dans les trois parties du pin gris P12.

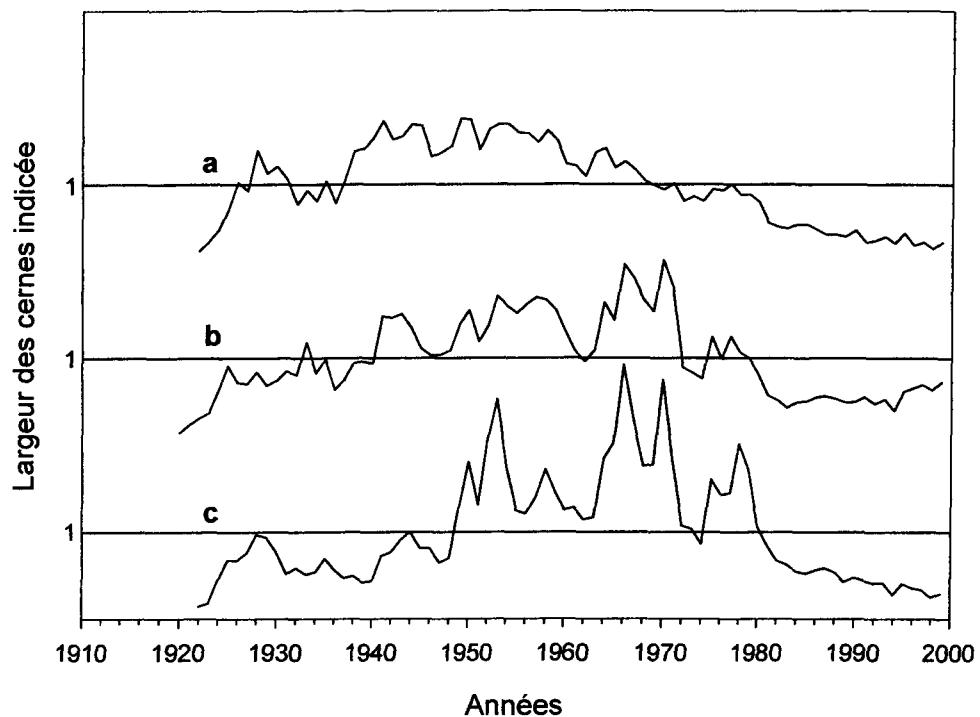


Figure 8. Largeur des cernes indicée : a) de la tige, b) de la racine pivotante et c) de la racine horizontale du pin gris P12.

Pendant les dix premières années, la tige a une croissance relativement plus rapide que les racines pivotante et horizontale dans le cas du pin P1 (Figure 9). En effet, la largeur

des cernes indicée atteint la valeur de 1 plus rapidement dans la tige. Ce phénomène a aussi été observé chez les autres pins. Le patron de croissance de la tige présente une bonne croissance radiale, suivie d'une réduction de croissance importante de 1958 à 1998. La racine pivotante montre une croissance radiale relativement stable jusqu'à la première diminution de croissance importante se produisant en 1960. Cependant, les racines pivotantes des pins P1 et P12 montrent plus de variation dans leur croissance radiale que les racines pivotantes des autres pins. La largeur des cernes indicée dans la racine horizontale subit de grandes variations comparativement à celles de la tige et de la racine pivotante. Une diminution de croissance synchrone dans la tige, la racine pivotante et la racine horizontale est visible de 1960 à 1962. De 1972 à 1974 et de 1980 à 1984, deux diminutions de croissance radiale synchrones surviennent dans les racines pivotante et horizontale. Suite à cette dernière diminution de croissance, la largeur des cernes indicée prend des valeurs en-dessous de la moyenne dans les trois parties de l'arbre et ce jusqu'en 1998, dernière année mesurée pour le pin gris P1.

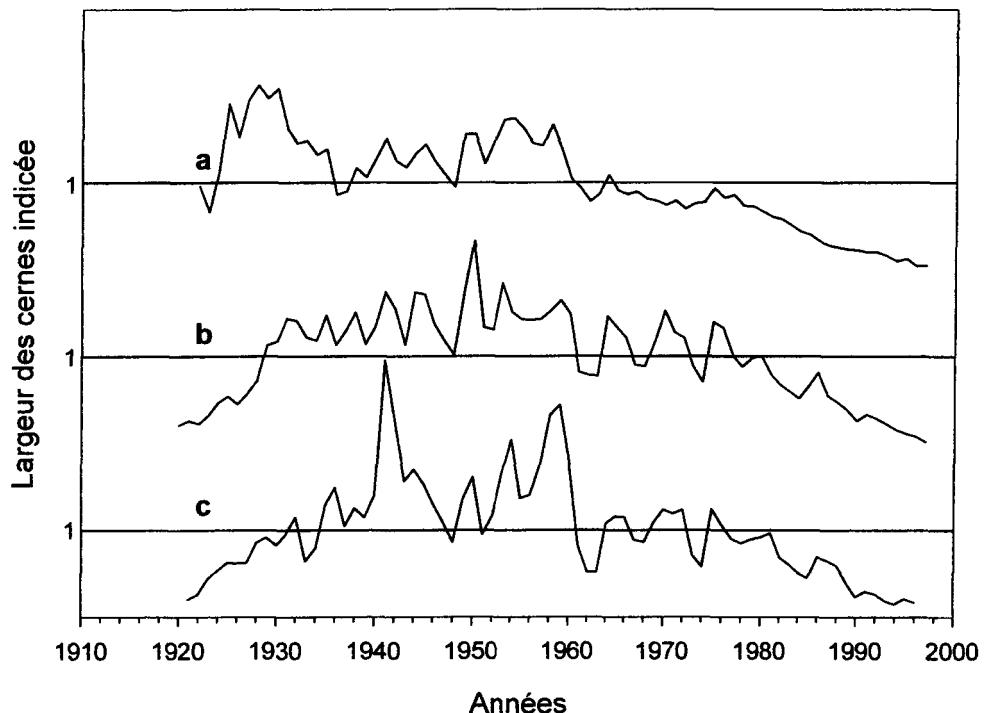


Figure 9. Largeur des cernes indicée : a) de la tige, b) de la racine pivotante et c) de la racine horizontale du pin gris P1.

3.2. CORRÉLATIONS TIGE/RACINE PIVOTANTE/RACINE HORIZONTALE

Le calcul des coefficients de corrélation entre la tige, la racine pivotante et la racine horizontale a été fait à partir de leurs chronologies. Cette démarche avait pour but de mettre en évidence les fortes ressemblances entre les trois parties d'un même arbre et entre les individus. Le seuil de confiance a été fixé à 99%.

Les coefficients de corrélation les plus élevés se trouvent entre la racine pivotante et la racine horizontale pour quatre des cinq pins gris (Tableau 1). Seul le pin P11 a un

coefficient de corrélation plus élevé entre la tige et la racine pivotante. À l'inverse, le coefficient de corrélation le plus faible a été calculé entre la chronologie indicée de la tige et celle de la racine horizontale, à l'exception du pin gris P13.

Les coefficients de corrélation moyens des cinq tiges, des cinq racines pivotantes et des cinq racines horizontales démontrent qu'il y a une très bonne concordance entre la chronologie moyenne des racines pivotantes et celle des racines horizontales (Tableau 1).

Tableau 1. Coefficients de corrélation entre la tige, la racine pivotante et la racine horizontale pour les pins P1, P10, P11, P12 et P13 et coefficients de corrélation des moyennes de chaque partie (Moyenne.).

Corrélation entre les trois parties de l'arbre			
	tige/racine pivotante	tige/racine horizontale	racines pivotante/horizontale
P1	0,618	0,554	0,840
P10	0,310	<i>0,015</i>	0,824
P11	0,668	<i>0,151</i>	0,666
P12	0,744	0,520	0,834
P13	-0,036	0,515	0,593
Moyenne	0,597	0,419	0,938

Valeurs en italique : coefficients de corrélation faibles (inférieurs au seuil de confiance fixé à 99%).

Valeurs en gras : coefficients de corrélation les plus élevés pour chaque pin gris.

La comparaison entre les cinq tiges montre des coefficients de corrélation qui sont tous supérieurs à 0,6 (Tableau 2). Les coefficients de corrélation les plus élevés se trouvent entre les chronologies des tiges des pins gris P10 et P13 de même qu'entre celles des pins P11 et P12, avec des valeurs de 0,938 et 0,939 respectivement. Les coefficients de corrélation entre les racines pivotantes sont variables. Les valeurs s'étendent de 0,041 entre les racines pivotantes de P1 et P13 à 0,794 entre celles de P11 et P12. Il y a deux

coefficients de corrélation non significatifs (inférieurs au seuil de confiance à 99%) entre les racines pivotantes des pins P1 et P10, et P1 et P13. Les coefficients de corrélation entre les racines horizontales sont également variables. Les chronologies des racines horizontales étant les mieux corrélées sont celles de P11 et P12, avec un coefficient de corrélation de 0,701. Entre les pins P1 et P11, le coefficient de corrélation est inférieur à la limite fixée, indiquant une corrélation faible (0,219). Aucune corrélation n'a été établie entre les chronologies des racines horizontales des pins P1 et P10, puisque le coefficient de corrélation est de -0,013.

Tableau 2. Coefficients de corrélation entre les cinq tiges, les cinq racines pivotantes et les cinq racines horizontales des pins gris P1, P10, P11, P12 et P13.

tige	tige				
	P1	P10	P11	P12	P13
P1	1,000				
P10	0,629	1,000			
P11	0,697	0,923	1,000		
P12	0,756	0,909	0,939	1,000	
P13	0,602	0,938	0,909	0,885	1,000

racine pivotante	racine pivotante				
	P1	P10	P11	P12	P13
P1	1,000				
P10	0,255	1,000			
P11	0,696	0,660	1,000		
P12	0,721	0,439	0,794	1,000	
P13	0,041	0,760	0,508	0,287	1,000

racine horizontale	racine horizontale				
	P1	P10	P11	P12	P13
P1	1,000				
P10	-0,013	1,000			
P11	0,219	0,655	1,000		
P12	0,402	0,428	0,701	1,000	
P13	0,487	0,549	0,571	0,531	1,000

Valeurs en italique : coefficients de corrélation faibles (inférieurs au seuil de confiance fixé à 99%).

Valeurs en gras : coefficients de corrélation les plus élevés pour chaque partie entre les pins gris.

Les racines horizontales sont divisées en une racine principale et des ramifications. La corrélation entre les chronologies de ces sections de ramification et la tige, la racine pivotante et la racine horizontale a été vérifiée dans chaque arbre (Tableau 3). Il y a une faible corrélation ou une absence de corrélation entre la tige et les ramifications dans les cinq pins gris. Les coefficients de corrélation entre les ramifications et la racine pivotante sont élevés pour les pins gris P1, P10 et P12. Les coefficients de corrélation entre les chronologies des ramifications et des racines horizontales sont supérieurs à 0,8, sauf dans le cas du pin gris P13.

Tableau 3. Coefficients de corrélation entre les ramifications de la racine horizontale et la tige, la racine pivotante et la racine horizontale dans les pins gris P1, P10, P11, P12 et P13.

corrélations			
	ramifications/tige	ramifications/racine pivotante	ramifications/racine horizontale
P1	0,396	0,629	0,879
P10	<i>-0,014</i>	0,794	0,969
P11	<i>-0,178</i>	0,287	0,882
P12	0,085	0,599	0,861
P13	<i>-0,746</i>	0,185	-0,232

Valeurs en italique : coefficients de corrélation faibles (inférieurs à 0,33).

Valeurs en gras : coefficients de corrélation les plus élevés pour chaque pin gris.

3.3. PROFILS LONGITUDINAUX D'ACCROISSEMENT RADIAL

Le profil longitudinal d'accroissement radial permet d'observer la croissance radiale des arbres à différentes hauteurs dans leur tige. Dans cette étude, il permet

également de voir la croissance radiale en fonction de la profondeur dans la racine pivotante et en fonction de la longueur dans la racine horizontale.

Les profils longitudinaux d'accroissement radial de la tige et de la racine pivotante du pin gris P1 sont présentés pour deux périodes de dix ans (Figure 10). La courbe regroupant les années 1960 à 1969 a été choisie car elle est représentative d'une croissance au-dessus de la moyenne (Figures 4 à 9). La deuxième période, correspondant à la dernière décennie avant la récolte (1990 à 1998), a été choisie parce qu'elle montre le défilement de la tige et de la racine pivotante durant une période de croissance radiale faible.

Dans la tige, il est possible de voir que la largeur des cernes augmente davantage vers la cime de l'arbre. Dans la courbe correspondant aux années 1960 à 1969, la valeur des largeurs de cernes dans la cime est presque 3 fois plus grande que celle à la base de celle-ci (0.90 : 2.36). Pour les années 1990 à 1998, le ratio de la largeur des cernes de la cime par rapport à la base est de 5 (0.08 : 0.40). L'accroissement radial de la racine pivotante dans les deux périodes choisies a été comparable à celui observé dans la tige. La croissance radiale au cours des années 1990 à 1998 a été beaucoup plus faible que celle durant la période de 1960 à 1969. Une légère augmentation de l'accroissement radial vers l'extrémité de la racine pivotante a été observée dans les deux périodes.

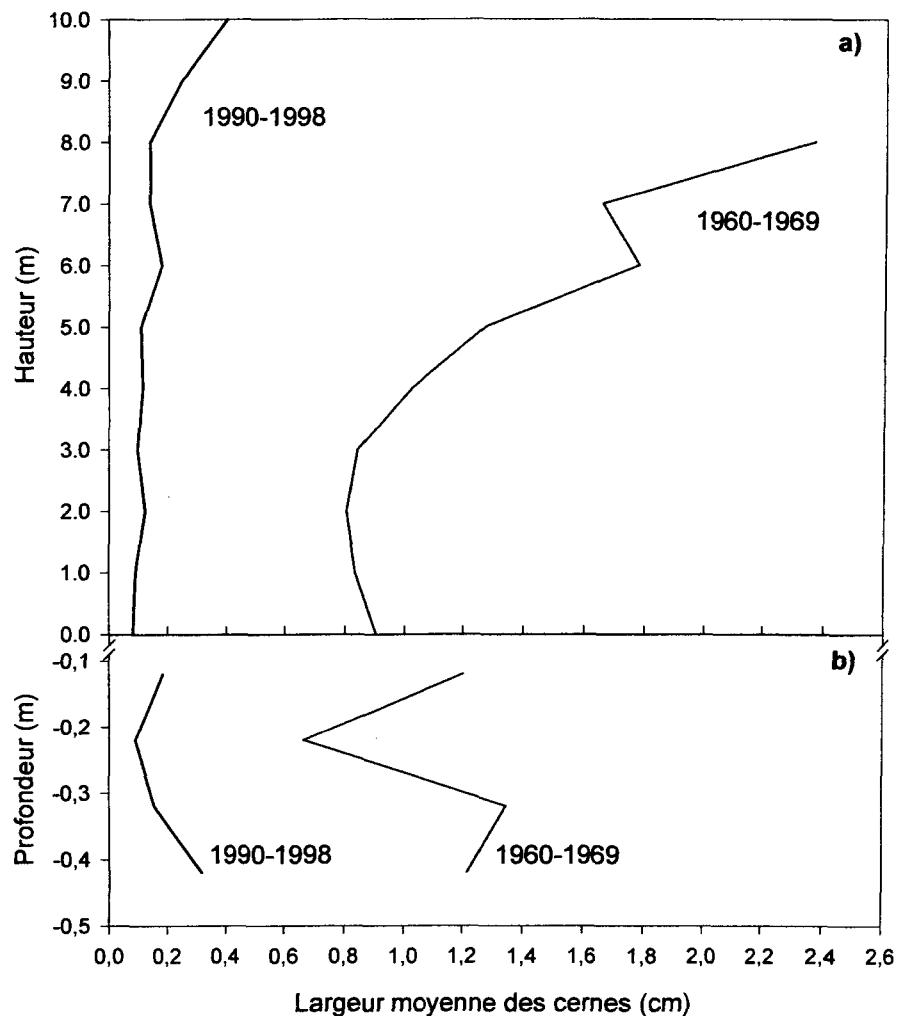


Figure 10. Profil longitudinal d'accroissement radial de 1960 à 1969 et de 1990 à 1998 pour le pin gris P1. a) tige; b) racine pivotante. Chaque point sur le graphique représente la moyenne des largeurs de cernes de croissance pour une période de 10 ans, à une hauteur donnée dans la tige et à une profondeur donnée dans la racine pivotante. L'échelle de l'axe des « y » change dans le profil de la racine pivotante.

3.3.1. Profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé

La représentation graphique de l'accroissement radial cumulé permet d'observer l'évolution de la croissance en diamètre au fil des ans ainsi que l'évolution de sa forme. Ce procédé a été utilisé dans la tige et les racines des 5 pins gris. Deux pins gris, P1 et P10, ont été choisis pour représenter les profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé (Figures 11 et 12) puisque les profils longitudinaux des autres arbres (annexe 1) comportent beaucoup de ressemblances avec ceux-ci.

3.3.1.1 Pin gris P1

Le profil longitudinal d'accroissement radial cumulé de la tige du pin gris P1 (Figure 11A) montre que le nombre de cernes diminue en hauteur. De plus, la réduction de la croissance en diamètre peut être observée tout le long de la tige dans les courbes correspondant aux deux dernières décennies, soit celles de 1980 à 1989 et de 1990 à 1998. Ces courbes sont très rapprochées l'une de l'autre par rapport à la distance séparant les autres courbes. Il est également possible de remarquer que d'une décennie à l'autre, l'accroissement radial cumulé est plus grand à une hauteur donnée dans la tige que celui observée à la base de celle-ci. Un exemple de ceci peut être observé à une hauteur de 4 m (traits noirs, Figure 11A).

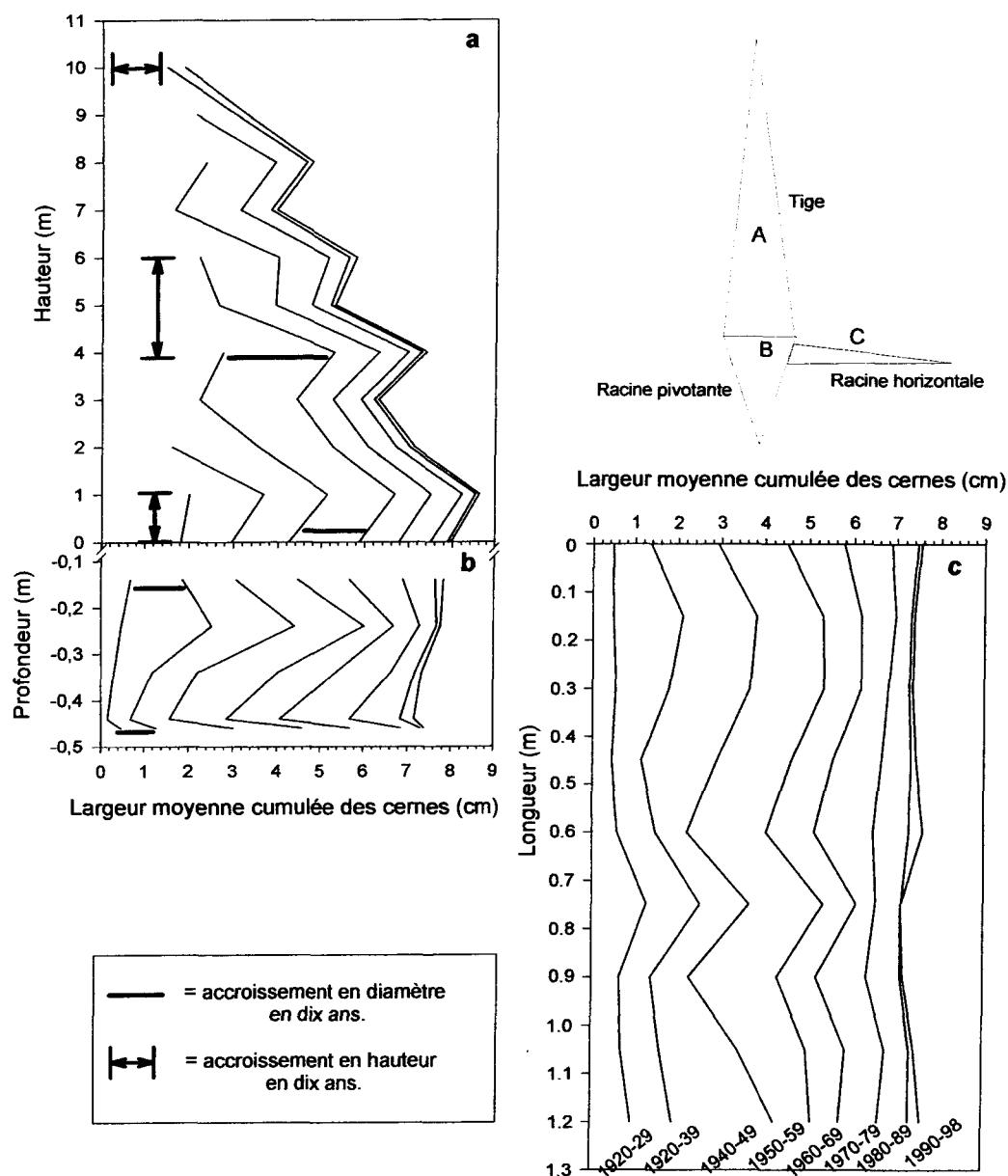


Figure 11. Profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé : a) de la tige, b) de la racine pivotante et c) de la racine horizontale pour le pin gris P1. Chaque courbe du profil représente la largeur moyenne cumulée des cernes pour une période de dix ans. La courbe de gauche correspond aux années 1920 à 1929, et celle de droite aux années 1990 à 1998.

Le taux de croissance en hauteur diminue aussi au cours des deux dernières décennies. Cette réduction peut être remarquée en observant l'accroissement en hauteur produit par la tige d'une décennie à l'autre. Par exemple, au cours de la première décennie (1920-1929), la tige montre un accroissement en hauteur de 1 m, puis un de 2 m durant la quatrième décennie. La croissance en hauteur entre les courbes 1980-1989 et 1990-1998, c'est-à-dire au cours des 20 dernières années environ avant l'échantillonnage, n'est que de 1 m (flèches noires, Figure 11A). Les tiges des pins gris P11 et P12 (Annexe 1) présentent chacune un profil longitudinal d'accroissement radial cumulé similaire à celui de la tige du pin gris P1, mais pour la tige de P11, une diminution de croissance radiale moins sévère est observée au cours des deux dernières décennies.

Le profil d'accroissement dans la racine pivotante présente un patron inversé et condensé de celui observé dans la tige mis à part le dernier point situé à 44 cm de profondeur (Figure 11B). La profondeur maximale mesurée (limite à laquelle la racine a été excavée) est atteinte dès les dix premières années (44 cm). En général, la largeur moyenne des cernes à proximité de l'interface tige-racine est plus grande que celle retrouvée dans la section à l'extrémité pointant dans le sol (traits noirs, Figure 11B). La chute de croissance en diamètre observée dans la tige lors des deux dernières décennies apparaît dans la racine pivotante, principalement durant les années 1990 à 1998. La racine pivotante du pin gris P11 présente un profil semblable à celui de la racine pivotante du pin P1.

En général, les racines horizontales présentent une croissance radiale beaucoup plus variable que celle dans la tige et la racine pivotante. Par contre, la racine horizontale du pin gris P1 reflète peu cette variabilité (Figure 11C). Le profil longitudinal d'accroissement radial cumulé de la racine horizontale permet de voir que dès la première décennie (1920-1929), elle avait atteint la longueur maximale mesurée de 1,2 m (longueur limite d'excavation de la racine). De plus, il est possible de remarquer que le diamètre de la racine horizontale ne diminue pas avec la distance à la racine pivotante puisque la largeur moyenne cumulée des cernes reste sensiblement la même à 0 m et à 1,2 m (Figure 11C). La diminution de croissance radiale observée dans la tige et la racine pivotante au cours des années 1990 à 1998 se retrouve également dans la racine horizontale.

3.3.1.2 Pin gris P10

L'observation du profil longitudinal d'accroissement radial cumulé de la tige du pin gris P10 montre qu'il y a une diminution du nombre de cernes vers la cime, comme il a été remarqué dans la tige du pin gris P1 (Figure 12A). La chute de croissance radiale se produisant dans la tige au cours des deux dernières décennies n'est pas aussi marquée qu'elle l'était dans la tige du pin gris P1. L'accroissement en diamètre de la tige à une hauteur donnée est plus grand que celui à la base de celle-ci, comme dans le cas du pin P1. Par exemple, de la quatrième à la cinquième décennie, l'accroissement en diamètre à 7 m de hauteur est presque deux fois plus grand que celui observée à la base de la tige (0,9 cm : 1,6 cm) (traits noirs, Figure 12A).

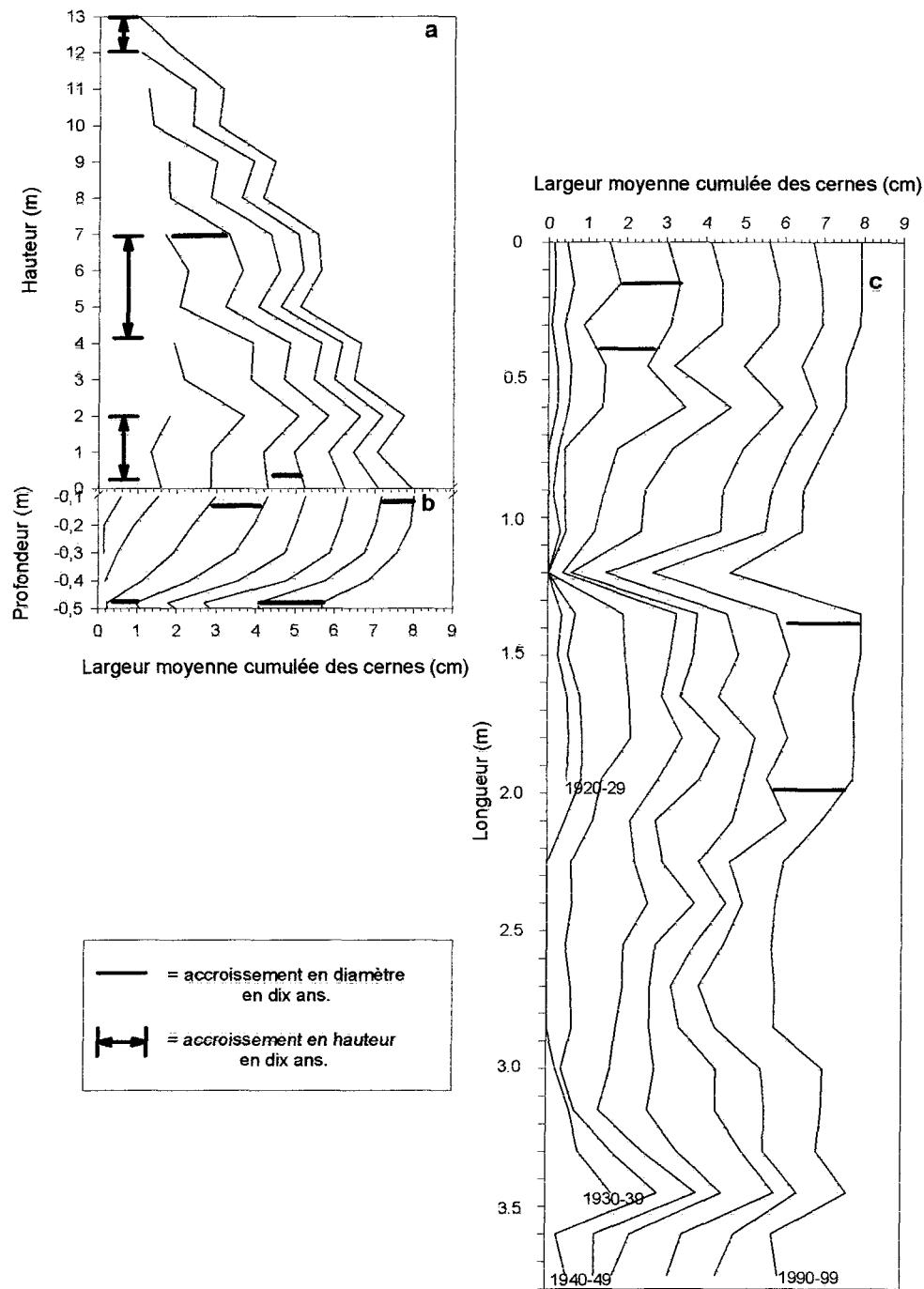


Figure 12. Profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé : a) de la tige, b) de la racine pivotante et c) de la racine horizontale du pin gris P10. Chaque courbe du profil représente la largeur moyenne cumulé des cernes pour une période de dix ans.

Pendant les dix premières années (1920-1929), l'arbre n'avait pas encore atteint 1 m, ce qui explique que la courbe correspondant à cette décennie n'apparaisse pas sur le profil longitudinal d'accroissement radial cumulé. La tige du pin gris P10 gagne jusqu'à 3 m en hauteur en dix ans (1940-1949 et 1950-1959), et lors des vingt dernières années, elle gagne 1 m par décennie, ce qui diffère de la croissance en hauteur observée dans la tige du pin gris P1 (flèches noires, Figure 12A).

Le patron inversé et condensé de la racine pivotante par rapport au patron de la tige décrit dans le cas du pin gris P1 peut être observé dans le cas du pin P10, à la figure 12B. L'accroissement en diamètre cumulé est plus important à l'interface tige-racine qu'à l'extrémité de la racine pivotante au cours des six premières décennies, et l'inverse se produit dans les deux dernières tranches de dix ans (traits noirs, Figure 12B). En effet, la distance séparant les trois dernières courbes correspondant aux années 1970-1979, 1980-1989 et 1990-1999 est plus grande à 50 cm sous le sol qu'à 10 cm de profondeur. Ceci n'a pas été observé dans la racine pivotante du pin P1. La racine pivotante du pin P10 atteint 30 cm de profondeur au cours de la première décennie et la profondeur maximale mesurée est atteinte après trente ans (48 cm), ce qui diffère de la croissance de la racine pivotante du pin gris P1, qui avait atteint sa longueur maximale mesurée lors de la première décennie (44 cm). La réduction abrupte dans la croissance radiale de la racine pivotante lors des deux dernières décennies n'est pas visible dans le cas du pin gris P10. Il est possible d'observer ces tendances dans le profil de la racine pivotante du pin P12 (Annexe 1).

Le profil longitudinal d'accroissement radial cumulé dans la racine horizontale permet de constater une grande variabilité dans la croissance en diamètre de celle-ci (Figure 12C). Par exemple, l'accroissement en diamètre le plus élevé s'est fait entre 15 et 40 cm au cours de la quatrième décennie alors qu'il se trouve à des longueurs de 1,4 à 2 m environ au cours des dix dernières années (traits noirs, Figure 12C). Malgré cette variabilité, il y a quelques tendances générales dans la largeur moyenne cumulée des cernes, comme la diminution de croissance se produisant à une distance de 1,2 m de la racine pivotante. De plus, le diamètre de la racine horizontale fluctue sur toute sa longueur mais diminue très peu de son insertion à la racine pivotante à son extrémité, comme il a été vu dans le cas de la racine horizontale du pin P1. La racine horizontale du pin P10 atteint une longueur de 1,95 m au cours de la première décennie et de 3,45 m lors de la décennie suivante. La longueur maximale mesurée est de 3,75 m et est atteinte au cours de la troisième décennie. Les profils des racines horizontales des pins P11 et P12 (Annexe 1) suivent la même tendance générale que le profil de la racine horizontale du pin gris P10.

Il est à noter que les cernes de croissance de 1920 à 1929 entre 75 cm et 1,20 m de longueur n'ont pas été formés alors qu'ils l'ont été à une distance plus grande dans la racine horizontale (de 1,22 m à 1,95 m). Le même phénomène est observé au cours des années 1930 à 1939 (il n'y a pas de cernes ayant été formés entre 2,25 m et 2,85 m). Ce phénomène est également présent dans les profils longitudinaux des racines horizontales des pins P11 et P13 et correspond à la présence de ramifications dans les racines horizontales (Annexe 1).

Les profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé de la tige, de la racine pivotante et de la racine horizontale du pin gris P13 sont tous semblables à ceux du pin gris P10 (Annexe 1).

3.4. COMPARAISONS DES RÉDUCTIONS DE CROISSANCE ENTRE LA TIGE, LA RACINE PIVOTANTE ET LA RACINE HORIZONTALE

L'analyse de la croissance radiale des pins gris par l'observation des chronologies indiquées a permis de constater que lorsqu'il y a une réduction de croissance marquée dans la tige, elle se répercute à différents degrés dans les racines pivotante et horizontale. Ce phénomène se produit principalement dans les vingt dernières années avant la récolte des pins gris (1980 à 1999).

Les taux de réduction de croissance significatifs (plus de 40% de réduction) sont présentés à partir de 1960 pour la tige, la racine pivotante et la racine horizontale de chaque pin gris (Figures 13 à 15 et Annexe 2).

Le pin gris P1 montre une réduction de croissance abrupte dans les trois parties au cours des vingt dernières années avant sa récolte (Figure 13). La tige subit une diminution de croissance de 40% en 1980 et cette réduction s'intensifie jusqu'à l'année de la récolte, en 1998. Les réductions de croissance supérieures à 40% dans les racines pivotante et horizontale débutent deux ans plus tard, soit en 1982, mais elles ont déjà une croissance réduite en 1962 et en 1963, puis en 1974. Les racines subissent des réductions de croissance abruptes synchrones et présentent une diminution de croissance moins

prononcée en 1987. Dans la racine horizontale, aucun cerne de croissance n'a été observé en 1997 et en 1998, et le même phénomène s'est produit en 1998 dans la racine pivotante. Ceci se traduit par une réduction de 100% pour ces années dans la figure 13.

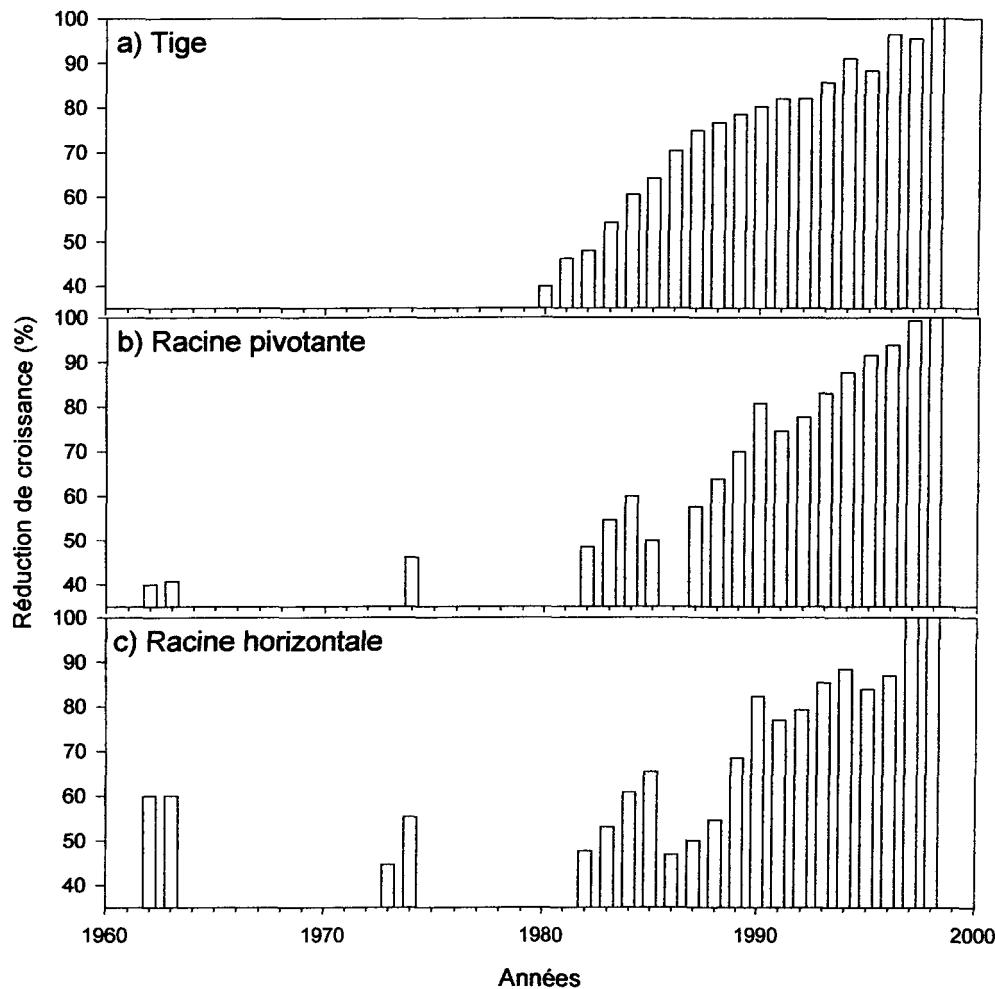


Figure 13. Pourcentages de réduction de croissance : a) dans la tige, b) dans la racine pivotante et c) dans la racine horizontale du pin gris P1 de 1960 à 1998. Une réduction supérieure à 40% est considérée significative (Schweingruber 1986). La croissance de 1981 à 1998 est comparée avec celle de 1940 à 1980. L'année 1981 correspond à l'année de l'impact.

La tige du pin gris P10 subit une réduction de croissance significative à partir de 1981 (Figure 14).

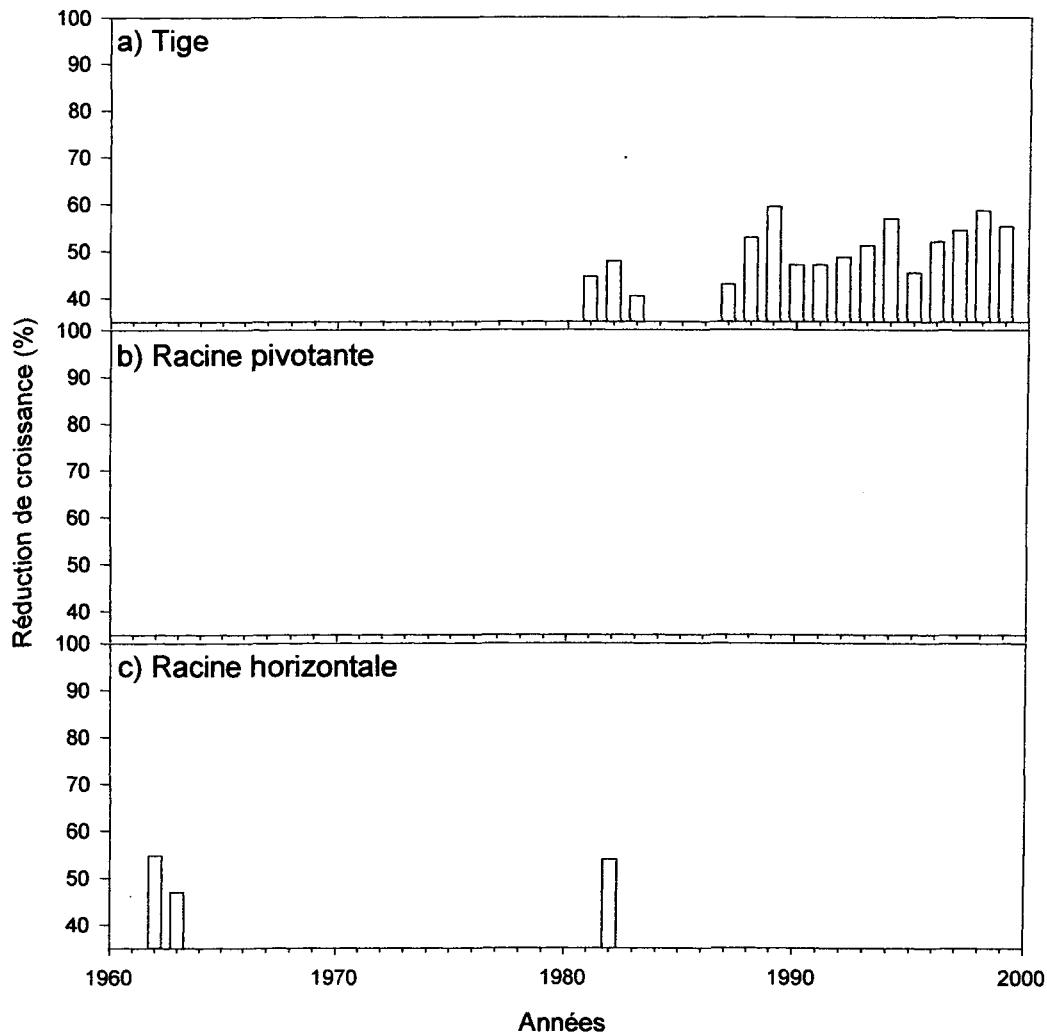


Figure 14. Pourcentages de réduction de croissance : a) dans la tige, b) dans la racine pivotante et c) dans la racine horizontale du pin gris P10 de 1960 à 1999. Une réduction supérieure à 40% est considérée significative (Schweingruber 1986). La croissance de 1981 à 1999 est comparée avec celle de 1940 à 1980. L'année 1981 correspond à l'année de l'impact.

Il n'y a pas de réduction significative dans la croissance radiale de 1984 à 1986, puis la réduction de plus de 40% reprend de 1987 à 1999. Aucune réduction significative n'a été observée dans la croissance de la racine pivotante. Dans la racine horizontale, des réductions de croissance abruptes isolées peuvent être observées en 1962 et en 1963, puis en 1982.

Le pin gris P11 (Figure 15) montre des réductions de croissance abruptes dans la tige de 1981 à 1999. Ces réductions se produisent par étapes, avec des pourcentages de réduction de plus en plus grands séparés par des périodes au cours desquelles les pourcentages sont moins élevés. Les réductions finissent par atteindre des taux de 70% en 1994. La racine pivotante subit des réductions de croissance significatives en 1962, en 1982, en 1985 et de 1988 à 1999. Dans la dernière décennie, on voit des taux de réduction synchrones avec ceux observés dans la tige. La racine horizontale subit des réductions de croissance abruptes de 1961 à 1963, en 1989, en 1990 et en 1994.

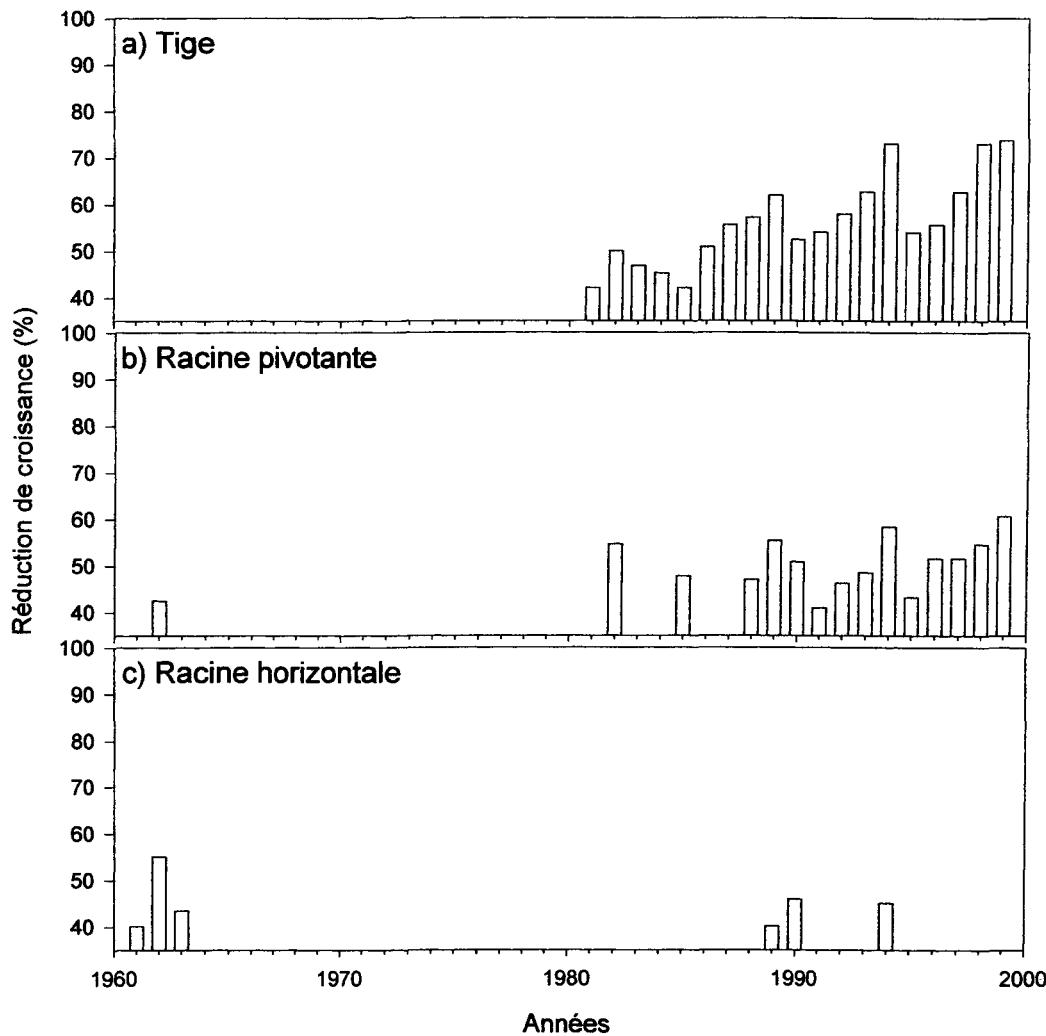


Figure 15. Pourcentages de réduction de croissance : a) dans la tige, b) dans la racine pivotante et c) dans la racine horizontale du pin gris P11 de 1960 à 1999. Une réduction supérieure à 40% est considérée significative (Schweingruber 1986). La croissance de 1981 à 1999 est comparée avec celle de 1940 à 1980. L'année 1981 correspond à l'année de l'impact.

En général, il est possible de voir qu'il y a un meilleur synchronisme entre les distributions des réductions de croissance dans la tige et la racine pivotante s'y rattachant, de même qu'entre les racines pivotante et horizontale d'un même arbre.

Les taux de réduction de croissance dans le pin gris P12 (Annexe 2) suivent un schéma presque semblable à ceux décrit pour le pin gris P1. Cependant, il n'y a pas de réduction de croissance significative observée dans les racines en 1962 et en 1963, et la réduction abrupte au cours des deux dernières décennies débute en 1981 dans les trois parties de l'arbre.

Le pin gris P13 (Annexe 2) montre des réductions de croissance significatives suivant la même tendance que celles observées dans le pin gris P10. Toutefois, il y a plus de réductions de croissance supérieures à 40% dans les trois parties du pin gris P13.

3.5. RACINES HORIZONTALES

3.5.1. Niveau d'insertion des racines horizontales

Les racines horizontales s'inséraient toutes en-dessous du niveau du collet dans la racine pivotante (Figure 16).

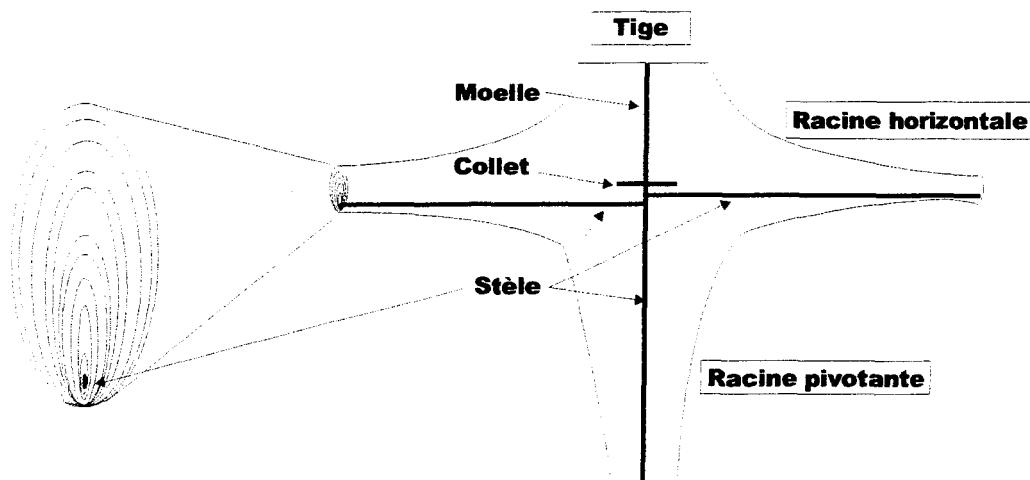


Figure 16. Schéma du point d'insertion d'une racine horizontale dans la racine pivotante.

3.5.2. Diminutions de croissance dans les racines horizontales

La préparation des racines horizontales a été laborieuse vu leur forme excentrique et irrégulière ainsi que leur croissance radiale lente. En effet, la surface de ces sections a été coupée plusieurs fois à l'aide de lames de rasoir afin de pouvoir observer le plus de cernes possibles.

Les profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé des racines horizontales ont montré que ces racines subissent des réductions de croissance abruptes. À titre exploratoire, la distance à la racine pivotante sur laquelle il y a des diminutions abruptes dans la croissance radiale de chaque racine horizontale a été représentée sous forme d'histogramme (Figure 17). Ces distances ont été calculées à partir des profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé des cinq racines horizontales. Lorsque les courbes du profil longitudinal d'une racine horizontale tendaient toutes vers la gauche dans l'axe des « y » représentant la largeur moyenne cumulée des cernes, la distance correspondant à cette diminution abrupte de croissance radiale était calculée et introduite dans un histogramme (Figure 17).

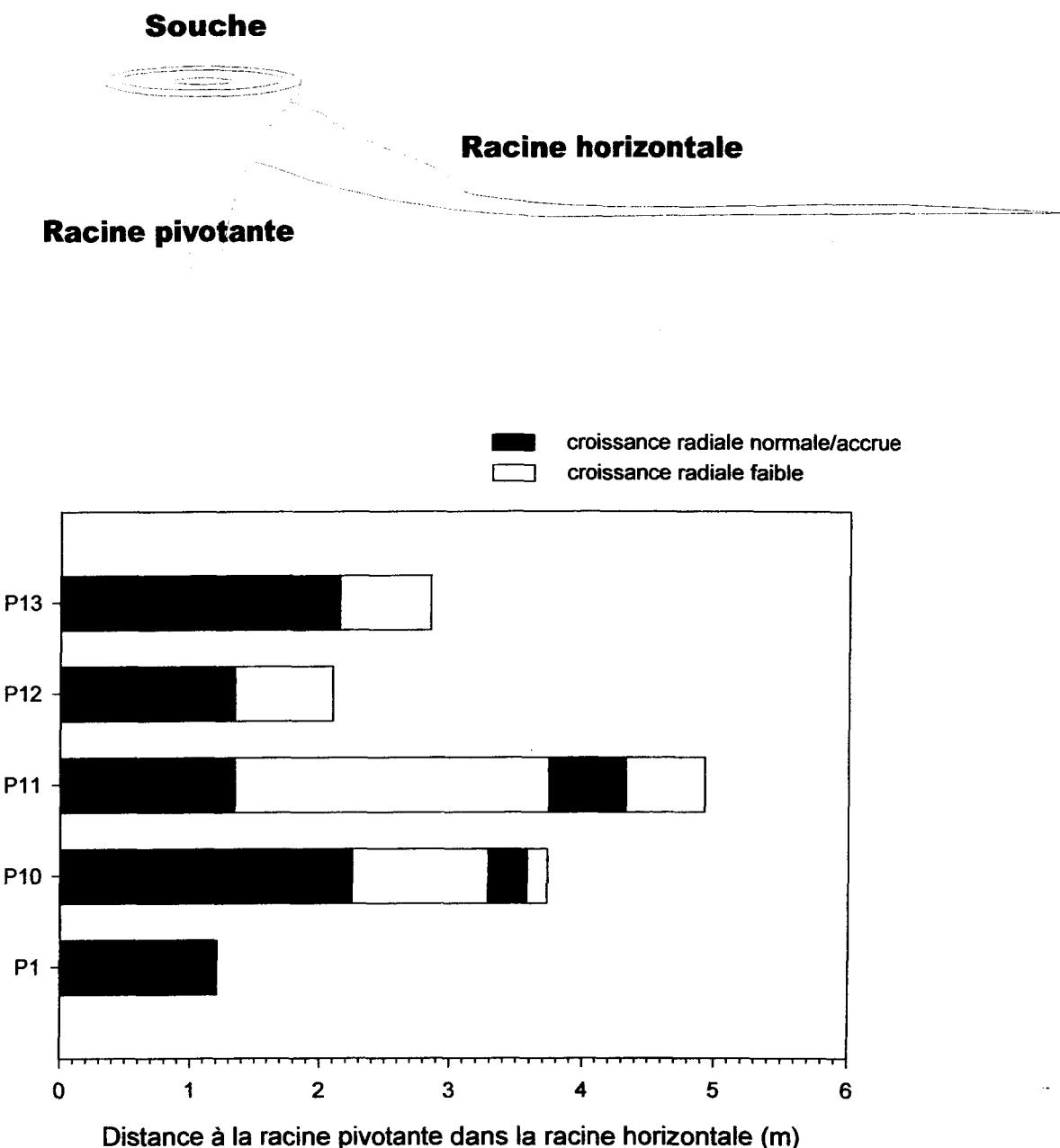


Figure 17. Réductions abruptes de la croissance radiale le long de chacune des cinq racines horizontales, à partir de la racine pivotante jusqu'à leur extrémité.

Une diminution abrupte dans la croissance radiale d'une racine horizontale indique que le rayon le plus long des sections mesurées diminue drastiquement malgré le fait que le

nombre de cernes de croissance soit presque le même que celui compté sur les sections plus grosses situées près de la racine pivotante. Les bandes noires représentent la distance à laquelle la croissance en diamètre est normale/accrue (Figure 17). Ces bandes noires montrent que de façon générale, il y a une bonne croissance radiale dans les cinq racines horizontales jusqu'à une distance d'environ 1,20 m de la racine pivotante. La racine horizontale du pin gris P1, ayant été mesurée jusqu'à une distance de 1,3 m (longueur totale d'excavation), ne présente pas de réduction abrupte dans la croissance en diamètre. Les autres racines horizontales comportent des réductions de croissance en diamètre importantes (bandes blanches, Figure 17). Les racines horizontales des pins gris P12 et P13 ont une croissance normale jusqu'à une distance de 1,35 et 2,15 m respectivement. À des distances ultérieures, la croissance radiale dans chacune de ces racines chute jusqu'à la dernière section mesurée. Il est possible de remarquer deux périodes de croissance normale/accrue en alternance avec deux périodes de croissance faible dans les racines horizontales des pins gris P10 et P11 (à 3,25 m et 3,75 m).

3.6. CERNES DISCONTINUS OU ABSENTS

Des cernes absents ont été notés à différents endroits dans les cinq pins gris. Les pins P1, P11 et P12 ont le même nombre de cernes absents dans leur tige et leur racine horizontale, soit 3 cernes absents dans la tige et la racine horizontale du pin gris P1 et 2 dans les tiges et les racines horizontales des pins P11 et P12. Pour les pins P10 et P13, le nombre de cernes absents est plus élevé dans la tige que dans les racines horizontales. En effet, il y a 2 cernes absents dans la tige du pin P10 alors qu'il n'y en a qu'un dans la racine

horizontale et dans le pin P13, il y a 4 cernes absents dans la tige alors qu'il n'y en a qu'un dans la racine horizontale. Dans les racines pivotantes, aucun cerne absent n'a été noté, à l'exception de la racine pivotante du pin gris P1, qui présente un cerne absent en 1998. Seul le pin gris P1 possède des cernes absents dans les dernières années de vie, alors que les autres pins gris ont des cernes absents uniquement à proximité de la moelle ou de la stèle.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

4.1. RELATIONS ENTRE LA CROISSANCE DE LA TIGE, DE LA RACINE PIVOTANTE ET D'UNE RACINE HORIZONTALE

4.1.1. Comparaison entre la croissance de la tige, de la racine pivotante et d'une racine horizontale

Le patron observé au niveau des basses-fréquences (variation de croissance à long terme) de la courbe de croissance des tiges correspond à la croissance normale typique des pins gris, soit une croissance plutôt rapide au cours des premières années de vie, suivie d'une croissance plus modérée et d'un ralentissement au cours des dernières années (Burns et Honkala 1990; Pothier et Savard 1998).

Pour chacun des pins gris, les patrons de la croissance radiale de la tige, de la racine pivotante et de la racine horizontale ont démontré un bon synchronisme entre les trois parties. L'observation de cette concordance au niveau des hautes-fréquences (variation annuelle de la croissance) des courbes est appuyée par les coefficients de corrélation. Ces derniers atteignent des valeurs de 0,74 entre les chronologies de la tige et de la racine pivotante et de 0,55 entre celles de la tige et de la racine horizontale. Entre les chronologies des racines pivotantes et horizontales, ils varient de 0,59 à 0,94. Krause et Eckstein (1993) et Krause et Morin (1998-1999) ont également obtenu des coefficients de corrélation significatifs pour les racines d'un même système racinaire. Dans l'étude de Krause et Morin par exemple, les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,50 dans la plupart des cas.

Les cernes repères observés en 1936, en 1962 et en 1980 dans les trois parties des pins gris corroborent également le bon synchronisme entre les parties au sein d'un arbre. De plus, ces cernes repères sont présents d'un individu à l'autre. Parmi les chercheurs ayant observé ceci, Krause et Eckstein (1992) mentionnent que les accroissements minimums et maximums sont, en majeure partie, retrouvés dans l'arbre en entier et qu'il y a des cernes repères non seulement à travers un arbre mais aussi entre les arbres. Ces derniers ont observé un bon synchronisme entre les arbres chez plusieurs espèces, dont le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.). Dans le cadre de la présente étude, il a été trouvé que le synchronisme de croissance d'un pin gris à l'autre est également très bon. Les coefficients de corrélation entre les tiges sont toutefois nettement plus élevés que ceux entre les racines pivotantes et entre les racines horizontales, ce qui reflète une plus grande variabilité au sein de ces deux parties pour un même site. Ceci a été observé par Krause et Morin (1998-1999), qui ont trouvé que le coefficient de corrélation entre les sections de tiges était plus élevé que celui entre les sections de racines chez des sapins baumiers provenant du même site. La tige est donc la partie de l'arbre où les variations de croissance radiale sont les moins grandes lorsque comparées d'un arbre à l'autre. Il est intéressant de remarquer que les patrons de croissance radiale des racines horizontales concordent bien avec ceux de leurs ramifications, ce qui vient peut-être du fait qu'elles sont influencées par les mêmes paramètres environnementaux.

Malgré le bon synchronisme de la croissance entre les trois parties au sein de chaque arbre, il y a des différences notables dans les tendances générales (basses-fréquences) de la croissance entre la tige et les racines pivotantes et horizontales. D'abord,

la tige montre une meilleure croissance radiale que les racines au cours des dix premières années. Ensuite, la variation inter-annuelle de la largeur indiquée des cernes est généralement plus grande dans les racines que dans la tige. Cette différence est surtout visible à partir de 1980 (Figures 5 à 9).

D'autre part, il est possible de discerner deux tendances dans la croissance radiale des pins gris, séparant ainsi les arbres en deux groupes : un groupe montrant une réduction de croissance marquée dans les trois parties étudiées et l'autre montrant une réduction de croissance moindre, surtout au niveau des racines. Lors d'une étude antérieure menée par Levasseur *et al.* (1999a) et portant sur des tiges de pins gris provenant du même secteur que celui où ont été prélevé les pins gris de cette étude, il a été observé que les arbres présentaient des patrons de croissance différents. En effet, quatre individus ne montraient pas la réduction de croissance marquée présente dans les autres arbres.

Les différences entre les patrons de croissance deviennent plus importantes dans les racines pivotantes, et c'est au niveau des racines horizontales que les patrons de croissance montrent le plus de variation. Les racines horizontales présentent des différences non seulement dans leurs patrons de croissance au sein d'un système racinaire, mais également dans ceux obtenus pour une même racine. Selon Fayle (1968), la croissance radiale des racines est souvent excentrique et variable, principalement à cause de la variabilité des sols et des diverses fonctions occupées par les différentes parties des racines. La fonction des racines à proximité de la tige est d'assurer la stabilité de l'arbre, alors que les racines distales assurent le transport de l'eau et des nutriments (Fayle 1968).

Ce même auteur mentionne que tout ces facteurs pourraient influencer simultanément le patron des racines individuelles (Fayle 1975b).

La distance séparant les trois parties étudiées dans les pins gris pourrait expliquer les différences observées dans les patrons de croissance d'une partie à l'autre. La tige et la racine horizontale sont les deux composantes les plus éloignées l'une de l'autre et c'est entre ces deux parties que la corrélation est la plus faible. Cependant, dans Krause et Morin (1998-1999), les coefficients de corrélation indiquent que les sections de racines latérales sont corrélées aux sections de la tige, et que les valeurs des coefficients de corrélation dans les racines varient peu avec la distance qu'elles occupent par rapport à la racine pivotante. La différence des substrats dans lesquels poussent la tige et les racines pourrait alors être à l'origine des résultats obtenus pour le pin gris. Le sol et les obstacles qu'il comporte offrent une grande résistance à la croissance des racines, qui s'enfouissent en profondeur dans celui-ci (Fayle 1968).

Finalement, la tige semble être la première affectée de façon marquée par les facteurs défavorables, puisque la largeur indiquée des cernes atteint des valeurs sous la moyenne plus tôt dans celle-ci en comparaison avec les racines. D'autre part, les racines semblent être moins sensibles aux facteurs défavorables, surtout celles des pins P10 et P13, qui ne montrent pas de réductions notables dans leur croissance radiale au cours des deux dernières décennies (Figures 5 et 6). Chez le sapin baumier, l'inverse a été observé, soit que les perturbations dues à la tordeuse des bourgeons de l'épinette étaient plus évidentes dans les sections de racines que dans celles des tiges (Krause et Morin 1995b).

4.1.2. Racines horizontales

À première vue, il semblait que certaines des racines horizontales des systèmes racinaires des pins gris prenaient naissance à partir de la tige. Le cas se produisant aurait indiqué que les pins gris possédaient des racines adventives, ce qui aurait été à l'encontre de la littérature (Bannan 1942). La vérification de la position de la stèle des racines horizontales a permis de confirmer que les racines des pins gris prennent toutes naissance sous le collet (Figure 16). Cette information est importante puisqu'elle suggère que des pins gris ayant subi un stress majeur, tel une épidémie d'insectes, seront retreints à l'utilisation des racines primaires au cours des années à suivre. D'autre part, les diminutions abruptes observées dans les racines horizontales (bandes blanches, Figure 17) correspondent aux parties des racines associées aux fonctions d'absorption et de transport. Cette information laisse supposer que les pins gris du site étudié pourraient avoir des carences dans leur apport en éléments nutritifs. Les parties des racines horizontales à proximité de la racine pivotante (bandes noires, Figure 17), reliées à la stabilité de l'arbre, montraient une croissance normale.

4.1.3. Relation entre le niveau du sol et la position du collet

La chronologie de la racine pivotante est une, parfois deux années de plus âgée que celles de la tige au niveau du sol et de la racine horizontale correspondantes. Lors de l'échantillonnage sur le terrain, le niveau du sol a été déterminé visuellement et correspond donc au niveau du sol comme tel ou au point de rencontre entre la tige et la partie supérieure de la racine latérale la plus haute du système racinaire. Une partie de cette

racine était alors visible au-dessus du sol. Cependant, comme la position du collet et le commencement de la racine primaire ont été déterminés par analyse anatomique en laboratoire après l'échantillonnage, il s'en suit que le niveau du sol déterminé visuellement ne correspond pas toujours au niveau du collet, d'où le décalage d'une à deux années observé entre la chronologie de la racine pivotante et celle de la tige.

La position du collet se situe légèrement au-dessous du niveau du sol (de 4 à 20 cm environ) en raison de l'accumulation de la matière organique au fil des années et de la croissance excentrique vers le haut des racines latérales (Figure 16). Les racines latérales à proximité de la surface du sol ont pris naissance sur la racine primaire mais avec le temps, la croissance secondaire de ces racines latérales s'effectue de façon excentrique. Les sections transversales de ces dernières présentent ainsi une forme en I (*I-cross sections* dans Fayle 1968). Cette forme résulte de la mise en place de cernes de croissance dont l'accroissement en diamètre est plus grand sur la surface supérieure que sur la surface inférieure de la section transversale (Figure 16). Cette forte croissance vers le haut a pour effet de déplacer la partie supérieure de certaines racines latérales au-dessus du niveau du collet au fil des ans mais la stèle de ces racines reste en-dessous de ce dernier.

L'absence de racines latérales adventives chez le pin gris constitue une différence importante entre le système racinaire de cette espèce et celui de l'épinette noire, qui possède de telles racines (DesRochers et Gagnon 1997). Conséquemment, l'âge obtenu au niveau du sol chez le pin gris peut être légèrement inférieur à l'âge réel de l'arbre, dû au développement excentrique des racines latérales. De façon générale, la position

approximative du collet chez le pin gris peut être déterminée en localisant la position de la stèle de la racine latérale la plus haute dans le système racinaire.

4.2. DESCRIPTION DE LA CROISSANCE RADIALE D'APRÈS UN PROFIL LONGITUDINAL

Le profil longitudinal d'accroissement radial non-cumulé de la tige du pin P1 (Figure 10) suggère qu'il y aurait une plus grande allocation d'énergie au niveau de la cime (les cernes de croissance y sont plus larges), que ce soit en période de croissance normale (1960-1969) ou en période de réduction de croissance abrupte (1990-1998). Selon Eckstein *et al.* (1989) et Krause et Eckstein (1993), l'accroissement est plus grand dans la cime des arbres lorsqu'ils sont soumis à des conditions défavorables. Ceci reflète l'importance d'alimenter les parties photosynthétiques de l'arbre même en période de stress. D'autre part, des études (Mott *et al.* 1957; Mitchell et Kellogg 1972; Myers 1963) ont démontré que les réponses de croissance aux stimuli environnementaux non-climatiques peuvent être plus intenses dans la couronne ou près de la base de la tige que dans les mesures de largeurs de cernes prises à hauteur de poitrine (LeBlanc *et al.* 1987). D'autres facteurs peuvent expliquer le fait que les cernes soient plus larges au niveau de la cime des tiges. Le cambium est plus jeune dans cette partie de la tige, ce qui cause une croissance plus rapide et plus vigoureuse (LeBlanc *et al.* 1987). Toutefois, il est important se mentionner que la circonférence à la cime étant plus petite que celle à la base de la tige, le volume de bois nécessaire pour y former un cerne est moins grand que celui qui doit être fourni à la base.

Le profil longitudinal d'accroissement radial cumulé du pin gris est caractérisé par des cernes larges au début du cycle vital, puis par une diminution graduelle de la largeur des cernes se produisant à maturité. Ce patron est visible dans les tiges, les racines pivotantes et les racines horizontales mais de façon moins constante dans ces dernières puisque leurs profils sont plus variables. Le fait que les cernes formés dans la tige et la racine pivotante soient plus larges au cours des premières décennies reflète la croissance normale des pins gris (Pothier et Savard 1998). Toutefois, il est à noter que selon Levasseur *et al.* (2001), l'âge n'est pas un bon indicateur du rythme de croissance des pins gris dans ce secteur. Il est mentionné qu'il peut arriver que de jeunes arbres subissent une baisse de croissance alors que des arbres plus âgés montrent une augmentation de leur rythme d'accroissement.

Les profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé des tiges montrent une forme effilée et peu conique, ce qui correspond à la description de la forme de la tige du pin gris en forêt (Farrar 1995).

Les profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé dans les racines ont rarement été discutés dans la littérature. De façon générale, le patron de la racine pivotante est l'inverse de celui de la tige en ce sens que les cernes sont plus larges en profondeur dans la racine pivotante alors que dans la tige, ils deviennent plus larges dans la cime. Ceci pourrait venir du fait que l'une des fonctions principales de la racine pivotante est d'ancrer l'arbre au sol (Raven *et al.* 1992). Il serait donc nécessaire que la racine pivotante, malgré qu'elle soit moins longue que la tige, soit aussi solide que cette dernière afin d'assurer le

maintien de l'arbre dans le sol. Par ailleurs, la profondeur maximum d'enracinement chez le pin rouge est atteinte dans la première décennie selon Fayle (1975a). La racine pivotante d'un pin gris (P1) semble corroborer ceci, alors que les 4 autres racines pivotantes atteignent la profondeur maximale mesurée après 3 décennies. Le sol aurait peut-être un degré de pénétrabilité peu élevé dans le secteur où les pins gris ont été prélevés.

Les profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé des racines horizontales présentent beaucoup plus de variabilité que ceux des tiges (Figures 11 et 12, Annexe 1). Krause et Eckstein (1993) ont remarqué que les profils des cernes de croissance variaient beaucoup plus dans les racines que dans les tiges et Krause et Morin (1995b) mentionnent que la réduction de la largeur des cernes de croissance est plus variable dans le système racinaire en comparaison avec celle dans la tige. Une hypothèse pouvant expliquer que la croissance radiale des racines horizontales soit plus variable que celle des tiges serait que ces deux composantes évoluent dans deux substrats très différents. Fayle (1974) rapporte que, pour une année donnée, les racines ne répondent pas toujours de la même façon, ce qui serait peut-être le résultat des changements dans la disponibilité d'humidité à différents endroits et à différentes profondeurs dans le sol. Les racines horizontales montrent également plus de variabilité que les racines pivotantes dans les profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé. Pourtant, les racines horizontales étant situées plus près de l'interface air-sol, devraient subir moins de résistance que les racines pivotantes, puisque celles-ci croissent vers le bas et subissent une résistance du sol dans toutes les directions.

Les profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé des racines horizontales montrent que leur diamètre reste sensiblement le même sur toute leur longueur, puis diminue légèrement à proximité des extrémités mesurées (Figures 11 et 12, Annexe 1). Krause et Morin (1995b) ont trouvé que le nombre de cernes restaient le même sur une longue distance dans les racines. Ce phénomène est observé dans les racines horizontales des pins gris et appuie l'observation faite quant à la croissance en longueur rapide de ces racines. Les racines horizontales atteignent la longueur maximale mesurée au cours de la première à la troisième décennie, ce qui est un peu plus tardif lorsque comparé avec les résultats de Fayle (1974), qui montrent un accroissement maximal en longueur dans les racines autour de la 5^e année. Cependant, une autre étude du même auteur (1975a) révèle que l'extension horizontale maximum des racines du pin rouge était virtuellement complète entre 15 et 20 ans, ce qui concorde avec les résultats des pins gris analysés dans cette étude. À ce moment, les racines horizontales ne sont peut-être pas toutes lignifiées, mais la longueur totale est atteinte hâtivement afin de pouvoir explorer le plus vaste territoire possible. De cette façon, les racines horizontales peuvent puiser le maximum d'eau et d'éléments nutritifs nécessaires à la croissance de l'arbre. En culture hydroponique, le système radiculaire du pin gris s'avère de 8 à 10 fois plus développé que celui de l'épinette noire dans les mêmes conditions, ce qui explique sa capacité de prendre un volume de terrain beaucoup plus grand et, par conséquent, de se contenter de sols ayant une concentration moindre en éléments minéraux (Lafond 1966).

4.2.1. Réductions significatives de croissance radiale

La réduction de croissance observée à partir de 1980 dans les chronologies et les profils longitudinaux d'accroissement radial cumulé des tiges et des racines est significative d'après le critère de Schweingruber (1986). Il est possible de constater que des réductions abruptes et significatives surviennent de façon ponctuelles dans les cinq individus au cours des années 1960 à 1964 et 1970 à 1974, puis de façon prolongée à partir de 1980 pour les pins P1, P11 et P12. D'autres études ont montré que des réductions de croissance se produisaient dans les pins gris vers 1960, et vers 1980 (Levasseur *et al.* 1999a) ainsi que de 1970 à 1975 (Levasseur *et al.* 2001).

D'autre part, la variation observée dans le commencement des réductions de croissance significatives au sein des racines est en accord avec les résultats observés par Krause et Morin (1999), montrant que le début des réductions de croissance de chaque embranchement dans un système racinaire est variable et peut différer d'un délai aussi long que 9 ans. Toutefois, ces mêmes auteurs (1995b) affirment que les racines réagissent de façon similaire aux tiges au cours des années influencées par des facteurs externes extrêmes, et ce malgré la grande variabilité dans leur croissance radiale. Ceci est observé chez les pins gris dans la présente étude au cours des années 1960 à 1962, 1980 à 1982 et 1988 à 1990.

4.3. COMPARAISON DU PATRON DE CROISSANCE DES TIGES DE CETTE ÉTUDE AVEC CELUI DE GRENON (1997)

Une comparaison de la croissance radiale annuelle moyenne des tiges des pins gris échantillonnés dans le cadre de cette étude avec celle des pins gris de l'étude de Grenon (1997) a permis d'émettre une hypothèse sur la cause des diminutions de la croissance (Figure 18).

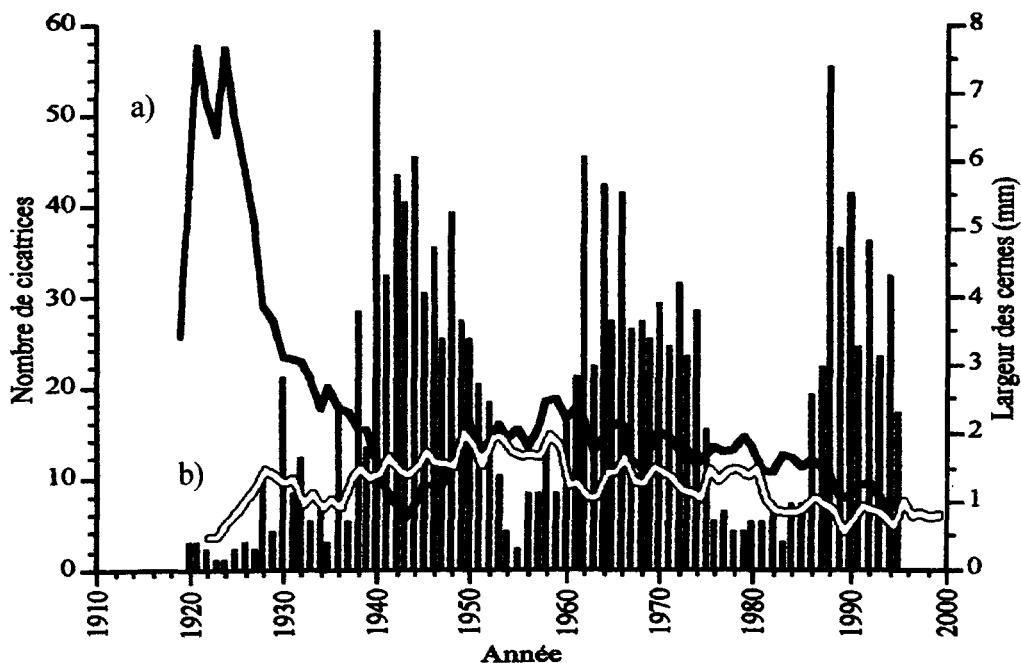


Figure 18. Comparaison des courbes de croissance radiale annuelle des tiges de pins gris a) de l'étude de Grenon (1997) ayant un effectif de 17 et b) de cette étude ayant un effectif de 5. Les barres verticales représentent le nombre de cicatrices de nodulier du pin gris à chaque année. Les deux courbes ont été faites à partir de données brutes.

La courbe de croissance des pins gris de Grenon (1997) est une courbe de croissance typique telle que décrite dans certains ouvrages (Cook et Kairiukstis 1990; Burns et Honkala 1990; Pothier et Savard 1998). De façon générale, le synchronisme entre les deux courbes présente deux tendances. D'abord, les pins gris du secteur de la rivière Nestaocano montrent une croissance radiale nettement inférieure à celle des pins gris du secteur de la Pointe-Racine (Grenon 1997) au cours des 20 premières années. Par la suite, la croissance radiale des pins gris analysés présente plusieurs ressemblances d'une étude à l'autre.

Dans Grenon (1997), il est mentionné qu'il y avait trois maximums dans le nombre de cicatrices du nodulier, soit en 1940 (59 cicatrices), en 1962 (45 cicatrices) et en 1988 (55 cicatrices). Les cernes absents retrouvés dans les pins gris du secteur de la rivière Nestaocano ne correspondent pas à ces années mais la croissance radiale de ces derniers subit des réductions de croissance synchrones à deux de ces maximums, soit celles de 1960 à 1962 et de 1988 à 1990. De plus, Grenon (1997) rapporte que les premiers signes de manifestation du nodulier du pin gris dans les relevés des plantations du Saguenay Lac-Saint-Jean remontent à 1988. Au cours de cette année, 75% des plantations de pin gris ont été atteintes par cet insecte. Le taux d'infestation diminue à 11 % en 1989, remonte à 95% en 1990, redescend à 15% en 1991, et est de 52% en 1998 (dans Grenon 1997). Les pins gris de la présente étude montrent des réductions de croissance significatives de 1988 à 1990, entre autres, et le pin P1 n'a pas formé de cerne en 1998. Ces ressemblances pourraient indiquer que les populations du nodulier du pin gris en plantation se comportent

de la même façon dans les peuplements naturels, ce qui a déjà été mentionné dans Grenon (1997).

En considérant la différence entre les deux courbes au cours des vingt premières années, il est difficile d'évaluer l'impact du nodulier du pin gris sur la croissance radiale dans cette période de temps. De plus, les pins gris de cette étude ne subissent pas de réduction de croissance comparable à celle qui est présente dans la courbe de Grenon (1997) en 1940 et les deux courbes montrent une réduction abrupte de la croissance vers 1980 mais il y a un décalage d'un an d'une courbe à l'autre. Ces différences sont peut-être dues au fait que les pins gris de Grenon (1997) proviennent de la Pointe-Racine, à au moins 150 km de distance de la région de Nestaocano, où se trouve le site de la présente étude. Malgré ces différences, la bonne correspondance entre la croissance radiale d'un site à l'autre à partir de 1941 indique que les facteurs qui ont causé les variations dans la croissance ont influencé les individus de façon similaire.

Il apparaît que le nodulier du pin gris aurait un impact sur les pins gris dans le secteur de la rivière Nestaocano, et que cet impact s'étendrait sur une grande superficie, ce qui appuie les conclusions déjà existantes dans la littérature (Grenon 1997). Une analyse détaillée des cicatrices de nodulier du pin gris est nécessaire pour confirmer ceci.

4.3.1. Potentiel de reprise de croissance

Les projections d'accroissement en volume dans Levasseur *et al.* (2001) prévoient une diminution du rythme d'accroissement pour la majorité des pins gris étudiés dans le

secteur de la rivière Nestaocano. Cependant, le calcul de ces projections ne tient pas compte des événements tels que les épidémies d'insectes ou les maladies, et les résultats de l'étude montrent que des traces du nodulier du pin gris ont été observées sur certains arbres. Ainsi, il est probable que d'autres épidémies de cet insecte se produisent dans le futur. Les résultats de cette étude-ci semblent indiquer que le potentiel de reprise de croissance est plutôt faible chez les pins gris, puisque seuls les pins P10 et P13 auraient eu une capacité à maintenir une croissance stable ou à reprendre une croissance normale au fil des années. Le pin P11 semble subir une diminution de croissance mais il est impossible d'affirmer avec certitude que cette diminution aurait perduré au fil des années. Le pin P12 aurait peut-être subit une reprise de croissance, mais les réductions abruptes dans la tige et la racine horizontale semblent infirmer cette hypothèse. Un pin gris (P1) serait sans doute mort avec le temps puisqu'il n'a pas formé de cerne dans la tige et les racines au cours de l'année de sa récolte.

D'autre part, la comparaison de nos résultats avec ceux de Grenon (1997) montrent que la croissance des pins gris dans cette étude était lente dès les premières années de croissance. Ainsi, il est possible que d'autres facteurs, en plus du nodulier du pin gris, aient un impact sur la croissance juvénile de ces pins gris. À titre exploratoire, les données de température (Annexe 3) et de précipitation (Annexe 4) à proximité du site d'échantillonnage ont été consultées (Environnement Canada 2000) mais aucun lien n'a pu être établi entre ces paramètres et les diminutions de croissance observées. Hamilton et Krause (1985) stipulent que les 5 éléments qui influent le plus la croissance du pin gris sont la présence d'éricacées, le drainage, le phosphore assimilable, le potassium assimilable et le

développement de l'horizon Ae. Ces éléments ne peuvent être discutés dans le cadre de cette étude mais devraient être considérés dans les études à venir. Les études à venir devraient se concentrer sur les premières années de vie des pins gris afin de savoir ce qui pourrait affecter leur croissance juvénile. De plus, l'échantillonnage devrait être plus grand pour être en mesure de tirer des conclusions à grande échelle. Dans cet ouvrage, le nombre d'échantillons a été jugé satisfaisant considérant l'ampleur du travail que représente la dendrochronologie dans les racines. Il serait également important d'obtenir une chronologie à partir d'autres espèces non affectées par le nodulier du pin gris dans les sites à proximité de celui étudié dans le cas présent afin de comparer leur croissance.

Finalement, il serait intéressant d'analyser la biomasse des racines fines ainsi que le renouvellement des poils absorbants afin d'approfondir les connaissances sur les diminutions de croissance au niveau racinaire puisque ces informations sont essentielles à l'évaluation du potentiel de reprise de croissance du pin gris.

CHAPITRE 5
CONCLUSION

En conclusion, les résultats de cette étude montrent qu'il y a un très bon synchronisme entre les patrons de croissance radiale de la tige, de la racine pivotante et de la racine horizontale d'un même pin gris et d'un pin gris à l'autre. Malgré la grande variation observée entre les patrons de croissance radiale des racines horizontales, il y a une similarité entre ceux-ci, permettant l'interdatation de la majorité des sections dans les racines de pins gris.

La croissance radiale des racines est une alternative intéressante dans l'étude de l'impact d'un stress sur la croissance des pins gris, surtout si la croissance de la tige est réduite au point où les variations inter-annuelles ne montrent plus les diminutions de croissance dans les chronologies.

Le patron des réductions de croissance radiale enregistrées dans les pins gris du secteur de Nestaocano étant synchrone avec celui des pins gris analysés par Grenon (1997) pourrait suggérer que la présence du nodulier du pin gris induit des réductions de croissance chez les pins gris dans ce secteur. Les réponses de la croissance radiale du pin gris face à cet insecte seraient différentes de la tige aux racines et d'un individu à l'autre. D'autre part, un individu a montré un cerne absent correspondant à l'année de sa récolte dans les trois parties étudiées. L'impact de cet insecte pourrait donc être dommageable pour les racines et serait dévastateur à long terme. Cependant, d'autres recherches devraient être effectuées afin de confirmer ces hypothèses.

BIBLIOGRAPHIE

- Agriculture Canada. 1987. Le système canadien de classification des sols. Seconde édition. Direction de la recherche. Agriculture Canada. Publication 1646. Ottawa. 170p.
- Anonyme. 1995. Insectes et maladies des arbres. Ressources naturelles Canada. Service canadien des forêts. Ministère des Ressources Naturelles du Québec. Direction de la conservation des forêts.
- Bannan, M. W. 1940. The root systems of Northern Ontario Conifers growing in sand. American J. of Bot. Vol.27: 108-114.
- Bannan, M. W. 1942. Notes on the origin of adventitious roots in the native Ontario conifers. American J. of Bot. Vol.29, No8 : 593-598.
- Blais, J. R. 1958. Effects of defoliation by spruce budworm (*Choristoneura fumiferana* Clem.) on radial growth at breast height of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) and white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss.). For. Chron. 34: 39-47.
- Borror, D. J. et R. E. White. 1991. Les insectes de l'Amérique du Nord (au nord du Mexique). Éditions Broquet Inc. Bibliothèque nationale du Québec. 408 p.
- Burns, R. M., et B. H. Honkala, tech. coords. 1990. Silvics of North America: 1. Conifers; 2. Hardwoods. Agriculture Handbook 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC. vol.2, 877 p.
- Caron, D. 1990. Analyse dendrochronologique des épidémies du Diprion de Swaine (*Neodiprion swainei* Midd.), secteur de la rivière à Mars. Initiation à la recherche. Chicoutimi, Université du Québec à Chicoutimi, Département des sciences fondamentales.
- Cayford, J. H. 1997. The Role of Fire in the Ecology and Silviculture of Jack Pine. Canadian Forestry Service, Department of Fisheries and Forestry. 221-244.
- Cook, E. R. et W.G. Kairiukstis. 1990. Methods of Dendrochronology, Applications in the Environmental Sciences. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.394 p.

- DesRochers, A., Gagnon, R. 1997. Is ring count at ground level a good estimation of black spruce age? *Can. J. For. Res.* 27: 1263-1267.
- Eckstein, D., C. Krause et J. Bauch. 1989. Dendroecological investigation of spruce trees (*Picea abies* (L.) Karst.) of different damage and canopy classes. *Holzforschung* 43: 411-417.
- Environnement Canada. 2000. Données climatiques quotidiennes du Canada sur CD-ROM, mise à jour de 1999. Environnement Canada, Service météorologique du Canada.
- Farrar, J. L. 1995. *Les Arbres du Canada*. Éditions Fides, Service canadien des forêts de Ressources naturelles Canada. Québec. 502 p.
- Fayle, D. C. F. 1968. Radial growth in tree roots. University of Toronto, Technical Report 9, 183p.
- Fayle, D. C. F. 1974. Root-shoot-environment relationships and growth of red pine. Institute of Forestry, Canada, Ontario. 149-153.
- Fayle, D. C. F. 1975a. Extension and longitudinal Growth During the Development of Red Pine Root Systems. *Can. J. For. Res.* 5: 109-121.
- Fayle, D. C. F. 1975b. Distribution of Radial Growth During the Development of Red Pine Root Systems. *Can. J. For. Res.* 5: 608-625.
- Fritts, H.C. 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press, New York 567 p.
- Grenon, F. 1997. Relation entre la présence du nodulier (*Petrova albicapitana*) et les diminutions de la croissance du pin gris (*Pinus banksiana*). Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Chicoutimi. 47 p.
- Hamilton, W. N. et H. H. Krause. 1985. Relationship between jack pine growth and site variables in New Brunswick plantations, *Can. J. For. Res.* 15: 922-926.

Hardy, S. 1998. Dynamique d'installation du système racinaire de la régénération pré-établie de l'épinette noire (*Picea mariana* Mill. B.S.P.) après coupe, mémoire de maîtrise Université du Québec à Chicoutimi, 70p.

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

Holmes, R. et E. R. Cook. 1999. Program Library. Utilisation manuel.

Krause, C. et D. Eckstein. 1992. Holzzuwachs an Ästen, Stamm und Wurzeln bei normaler und extremer Witterung. P.215-242 Dans Michaelis, W., Bach, J. (eds.): Luftverunreinigungen und Waldschäden am Standort 'Postturm', Forstamt Farchau/Ratzeburg. GKSS- Forschungszentrum Geesthacht, GKSS 92/E/100.

Krause, C. et D. Eckstein. 1993. Dendrochronology of roots. Dendrochronologia 11: 9-23.

Krause, C. et M. Fournier. 1996. Development and initiation of the root system of old black spruces and balsam firs. Proceedings of International root symposium, 20-24 juin 1996, Jérusalem, Israël.

Krause, C. et H. Morin. 1995a. Impact of spruce budworm defoliation on the number of latewood tracheids in balsam fir and black spruce. Can. J. For. Res. 25: 2029-2034.

Krause, C. et H. Morin. 1995b. Changes in radial increment in stems and roots of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) after defoliation by spruce budworm. For. Chron. 71: 747-754.

Krause, C. et H. Morin. 1998-1999. Root growth and absent rings in mature black spruce and balsam fir, Quebec, Canada. Dendrochronologia 16-17:21-35.

Krause, C. et H. Morin. 1999. Tree-ring patterns in stems and root systems of black spruce (*Picea mariana*) caused by spruce budworms. Can. J. For. Res. 29: 1583-1591.

- Lafond, A. 1966. Écologie de quatre conifères du Québec : Le Naturaliste Canadien. 93 : 834-841.
- Law, K.-N. et J. L. Valade. 1994. Status of the utilization of jack pine (*Pinus banksiana*) in the pulp and paper industry. Can. J. For. Res. 24: 2078-2084.
- LeBlanc, D. C., D. J. Raynal et E. H. White. 1987. Acidic Deposition and Tree Growth : I. The Use of Stem Analysis to Study Historical Growth Patterns. J. Environ. Qual., Vol.16 : p. 325-333.
- Levasseur, V., G. Savard et R. Gagnon. 1999a. Projections de l'accroissement en diamètre de pins gris provenant du secteur Nestaocano. Laboratoire d'écologie végétale. Université du Québec à Chicoutimi. 12 p.
- Levasseur, V., R. Gagnon et G. Savard. 1999b. Rapport exploratoire sur la croissance du pin gris et de l'épinette noire dans le secteur du camp Nestaocano. Université du Québec à Chicoutimi. 69 p.
- Levasseur, V., R. Gagnon et G. Savard. 2001. Étude exploratoire sur la croissance d'épinettes noires et de pins gris dans le secteur du futur camp Nestaocano 2. Université du Québec à Chicoutimi. 62 p.
- Lussier, J.- M. 1996. Reconstitution de la dynamique récente de pessières noires vierges et de seconde venue. Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal, 125 p.
- MacLean, D. A. 1981. Impact of defoliation by spruce budworm populations on radial and volume growth of balsam fir: a review of present knowledge. Mitt. Forstl. Dundes. Wien. 142: 293-306.
- Martineau, R. 1984. Insectes nuisibles des forêts de l'est du Canada, Éditions Marcel Broquet inc. LaPrairie. P. 70-72.

Ministère de l'Énergie et des Ressources. 1990. Petite flore forestière du Québec 2^e édition. Les Publications du Québec. 249p.

Ministère des Ressources naturelles. 2000. Guide de terrain d'identification du type écologique : sous-domaine de la pessière à mousses de l'ouest. Forêt Québec. Division classification écologique et productivité des stations. 47p.

Mitchell, K. J., et R. M. Kellogg. 1972. Distribution of area increment over the bole of fertilized Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 2: 95-97.

Morin H. et D. Laprise. 1990. Histoire récente des épidémies de la Tordeuse des bourgeons de l'épinette au nord du Lac Saint-Jean (Québec) : une analyse dendrochronologique. *Can. J. For. Res.* 20: 1-8.

Mott, D. G., L. D. Nairn et J. A. Cook. 1957. Radial growth in forest trees and effects of insect defoliation. *For. Sci.* 3: 286-304.

Myers, C. A. 1963. Vertical distribution of annual increment in thinned ponderosa pine. *For. Sci.* 9: 394-404.

Pothier, D. et F. Savard. 1998. Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec. Ministère des Ressources naturelles. Gouvernement du Québec. 183p.

Raven, P. H., Evert, R. F., et Eichhorn, S. E. 1992. *Biology of Plants*. Fifth Edition. W. H. Freeman and Company/Worth Publishers: New York.

Saucier, J.-P, J.-F. Bergeron, P. Grondin et A. Robitaille. 1998. Les régions écologiques du Québec méridional (3^e version) : un des éléments du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des Ressources naturelles du Québec. *L'Aubelle*, 124 : 14-25.

Schulman, E. 1945. Root growth-rings and chronology. *Tree-ring Bull.* 12: 2-5.

Schweingruber, F.H. 1986. Abrupt growth changes in conifers. IAWA (Int. Assoc. Wood Anat.) Bul. 7:277-283.

Stokes, M.A. et Smiley T.L. 1968. An introduction to tree-ring dating. Univ. Of Chicago Press, Chicago, London, 73 pp.

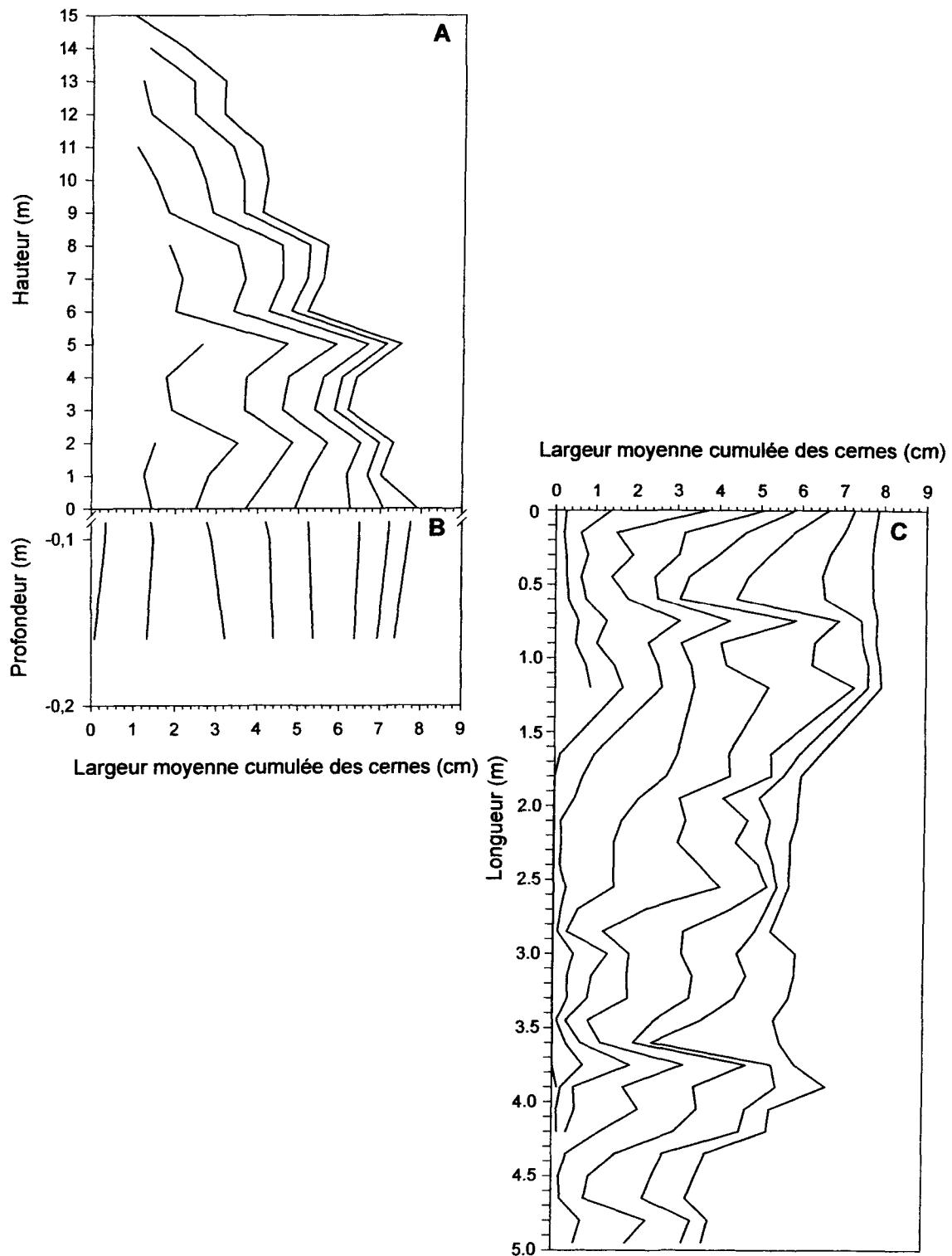
Strong, W. L. et G. H. La Roi. 1983. Root-system morphology of common boreal forest trees in Alberta, Canada. Can. J. For. Res. 13: 1164-1173.

Sutton, R. F. 1980. Root System Morphogenesis. N. Z. J. For. Sci. 10 (1): 264-292.

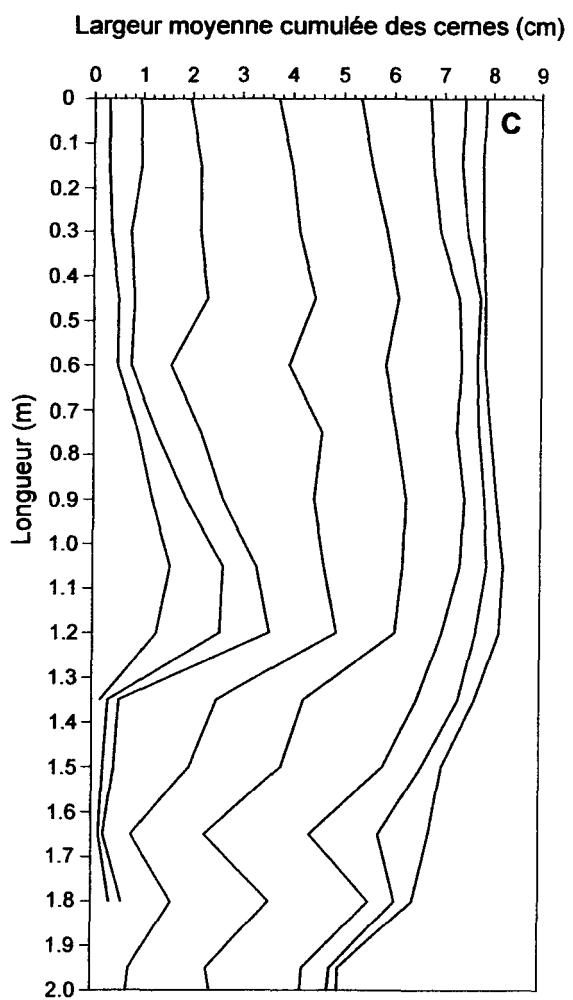
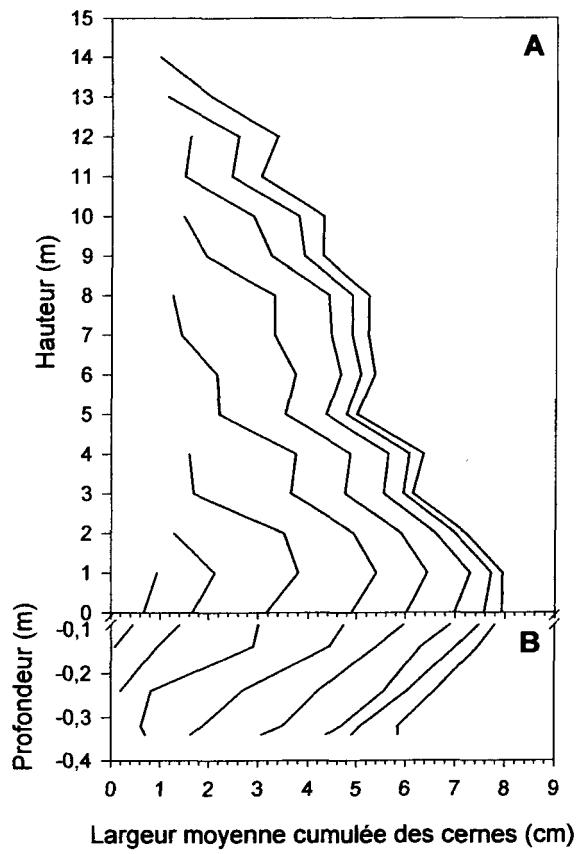
ANNEXE 1

**PROFILS LONGITUDINAUX D'ACCROISSEMENT RADIAL CUMULÉ DES
PINS GRIS P11, P12 ET P13**

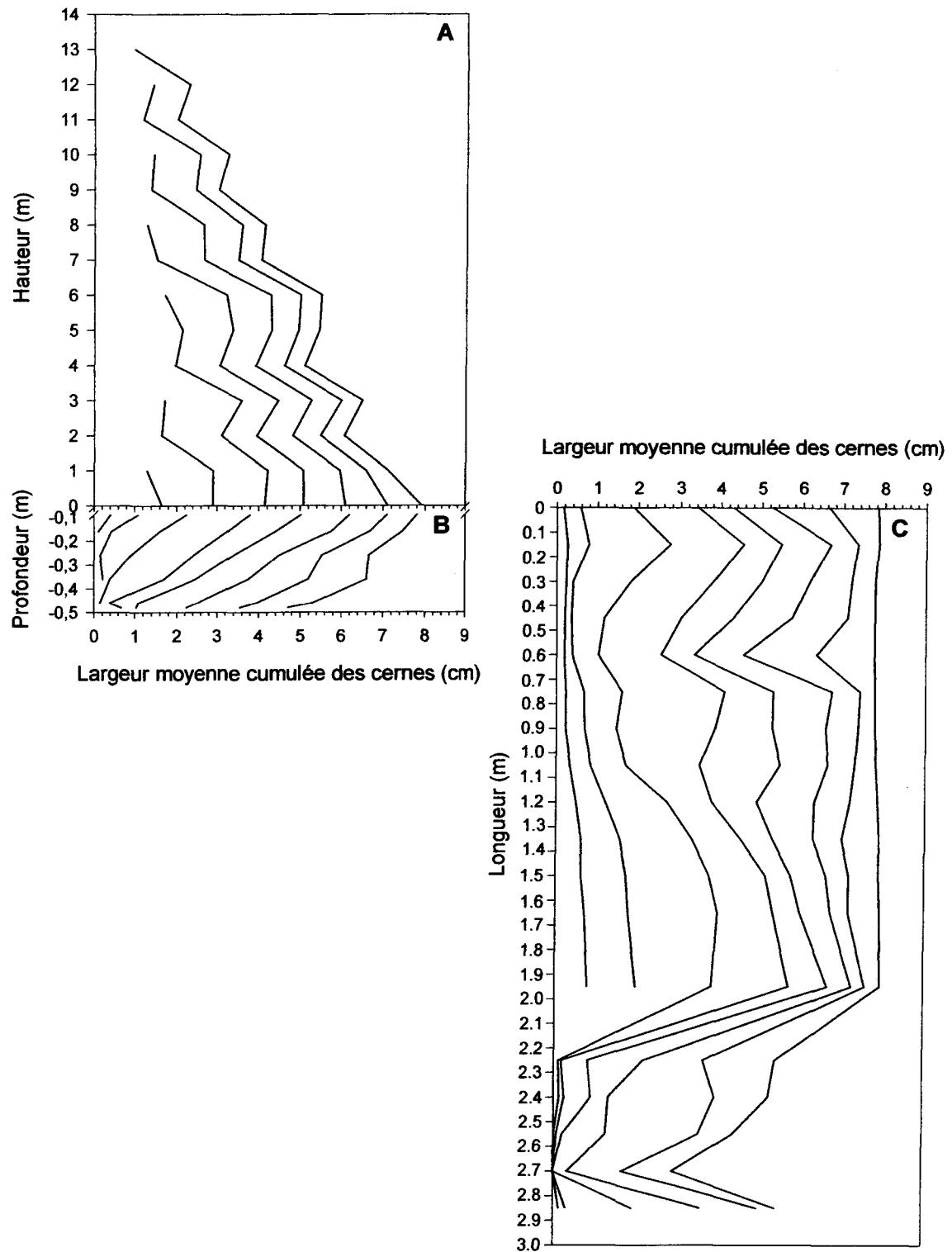
Pin gris P11



Pin gris P12



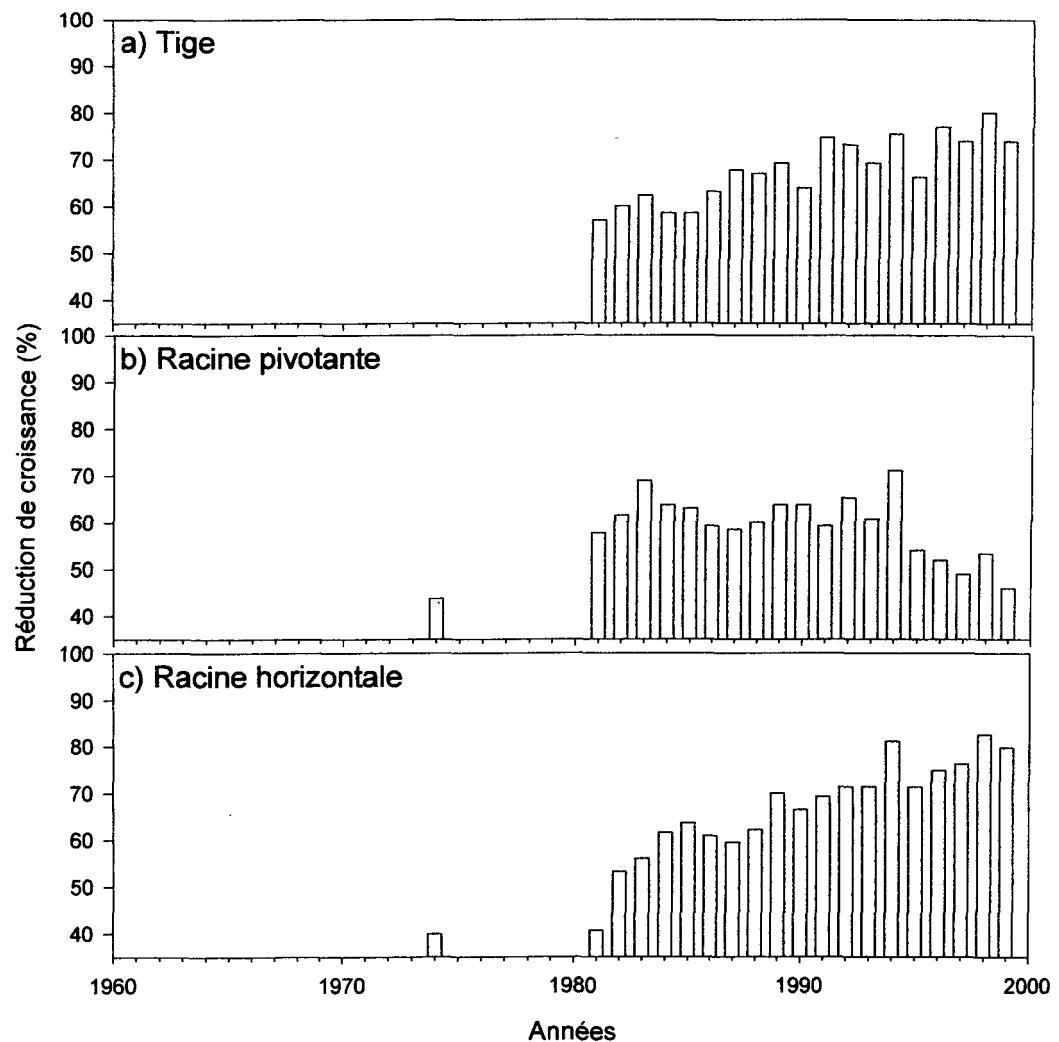
Pin gris P13



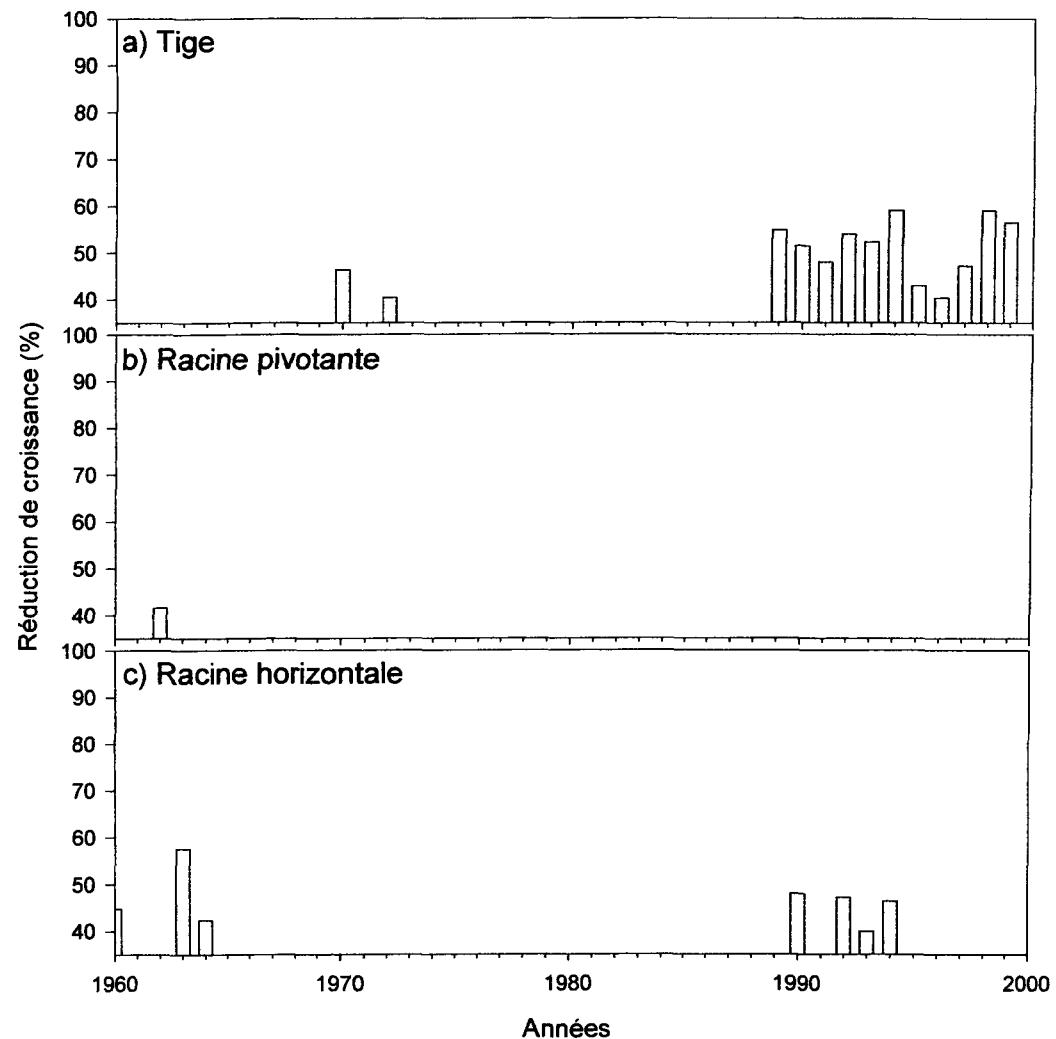
ANNEXE 2

HISTOGRAMMES DES PINS GRIS P12 ET P13

Histogrammes du pin gris P12



Histogrammes du pin gris P13



ANNEXE 3
DONNÉES DE TEMPÉRATURE

Station Chibougamau

Moy. station 1936-1975	1960		1961		1962		1963		
	T moy.	Écart							
mai	6,3	11,6	5,3	5,6	0,7	7,6	1,3	6,1	0,2
juin	13,1	13,4	0,3	11,4	1,7	13,6	0,5	13,8	0,7
juillet	16	14,5	1,5	16,3	0,3	14,7	1,3	n.d.	n.d.
août	14,7	14,6	0,1	15,2	0,5	14,7	0	n.d.	n.d.
septembre	9,7	9,9	0,2	13	3,3	9	0,7	n.d.	n.d.

Station Chibougamau A

Moy. station 1971-1982	1979		1980		1981		
	T moy.	Écart	T moy.	Écart	T moy.	Écart	
mai	7,6	8,1	0,5	8,7	1,1	6,3	1,3
juin	13,5	14	0,5	11,5	2	13	0,5
juillet	16,2	16,5	0,3	15,3	0,9	17,1	0,9
août	14,5	12,7	1,8	16,5	2	16,1	1,6
septembre	8,3	7,9	0,4	6,7	1,6	10,1	1,8

n.d.: non disponible

Moy.station: moyenne du mois pour toutes les années au cours desquelles les données ont été enregistrées

T moy.: température moyenne annuelle pour le mois

Écart: différence entre la température moyenne annuelle du mois et la moyenne du mois pour toutes les années

ANNEXE 4

DONNÉES DE PRÉCIPITATIONS

Station Chibougamau

	Moy. station 1936-1975	1960		1961		1962		1963	
		P moy.	Écart						
mai	76,1	100,3	24,2	67	9,1	105,3	29,2	70,5	5,6
juin	110,5	110,6	0,1	45,8	64,7	81,1	29,4	172,6	62,1
juillet	122,5	201,2	78,7	83	39,5	193,7	71,2	n.d.	n.d.
août	113,1	190,6	77,5	120,1	7	104	9,1	n.d.	n.d.
septembre	116,4	104,8	11,6	123,7	7,3	131	14,6	n.d.	n.d.

Station Chibougamau A

	Moy. station 1971-1982	1979		1980		1981	
		P moy.	Écart	P moy.	Écart	P moy.	Écart
mai	84,1	96,6	12,5	50,8	33,3	81	3,1
juin	111,1	110,6	0,5	84	27,1	80,3	30,8
juillet	117,2	155,9	38,7	143	25,8	52,9	64,3
août	107,4	116,6	9,2	128,2	20,8	50,5	56,9
septembre	124,1	142,2	18,1	136,8	12,7	170,8	46,7

n.d.: non disponible

Moy.station: moyenne du mois pour toutes les années au cours desquelles les données ont été enregistrées

P moy.: moyenne annuelle des précipitations pour le mois

Écart: différence entre la moyenne annuelle des précipitations du mois et la moyenne du mois pour toutes les années