

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN RESSOURCES REVOUVELABLES

par

Claude Gagné,

B. Sc. Aménagement des ressources forestières

Tendance à long terme de la croissance de l'épinette noire (Picea mariana
(Mill.) B.S.P.) en forêt boréale québécoise.

Mai 2000



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

Les changements environnementaux, en particulier les fluctuations climatiques, actuels et futurs, peuvent avoir des conséquences importantes sur la croissance des arbres et des peuplements forestiers. Plusieurs résultats en Europe, en Amérique du Nord et ailleurs dans le monde montrent une tendance à l'augmentation de la productivité des forêts à long terme en milieu tempéré, montagnard et subarctique. Cependant, aucune recherche de ce type n'a été effectuée en forêt boréale naturelle productive au Québec. Cette recherche a pour but d'étudier l'évolution de la productivité en forêt boréale naturelle au cours du siècle dernier, en comparant la croissance radiale, en hauteur et en volume d'épinettes noires âgées (âge moyen de 175 ans) avec celle de jeunes épinettes noires (âge moyen de 65 ans).

Des échantillons ont été prélevés dans 20 placettes, regroupées dans 10 paires (un peuplement jeune et un peuplement âgé). Cinq arbres dominants dans chaque placette ont été abattus et leur croissance reconstruite par analyse de tige. Les peuplements de chaque paire sont situés sur un type de station similaire et à peu de distance l'un de l'autre.

Les résultats montrent une tendance positive quant à l'augmentation de la croissance radiale, en hauteur et en volume de l'épinette noire depuis le siècle dernier pour 8 paires sur 10 pour tous les paramètres étudiés, sauf pour la largeur de cerne (7 paires sur 10). La différence de croissance se manifeste surtout pour les âges jeunes. Des causes multiples et indissociables dans le cadre de cette recherche ont pu provoquer une telle différence de croissance. La croissance juvénile des vieux peuplements aurait été fortement ralentie par des événements épisodiques, contrairement aux jeunes peuplements. L'établissement des vieux peuplements au moment d'une période climatique défavorable (Petit âge glaciaire) ou d'une épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette sont considérés comme des hypothèses principales pouvant expliquer une différence de croissance. Une augmentation du CO₂ atmosphérique et de la température sont également des hypothèses pouvant expliquer une augmentation de la croissance. D'autres études sont nécessaires afin de confirmer ou infirmer une telle tendance à l'augmentation de la productivité, notamment sur d'autres espèces de la forêt boréale québécoise, et en utilisant également d'autres méthodes déjà établies en Europe.

REMERCIEMENTS

De nombreuses personnes sont à remercier pour leur aide précieuse dans l'élaboration de ce travail. Tout d'abord M. Hubert Morin, mon directeur de thèse, qui m'a conseillé tout au long de la réalisation de ce projet de maîtrise. De plus, je dois remercier tout spécialement M. Jean-Luc Dupouey, de l'Unité Écophysiologie Forestière de L'INRA de Nancy, France. Celui-ci a établi la méthodologie à appliquer et il a également recueilli une partie des échantillons nécessaires à cette étude. Son expérience, son aide très précieuse et ses nombreux conseils ont été très utiles et même indispensables. Je dois également remercier M. Germain Savard, M. François Gionest et Mme Julie Valcourt pour leurs efforts fournis lors du travail de terrain et de laboratoire. Sans oublier M. Pierre-Yves Plourde pour son aide lors de l'interdatation et Mme Annie Deslauriers pour ses judicieux conseils au moment de la rédaction. Je dois également souligner l'aide apportée par les nombreux étudiants qui occupaient des emplois au Laboratoire d'écologie végétale de l'UQAC l'été ou durant l'année scolaire et qui m'ont aidé d'une manière où d'une autre dans la manipulation des échantillons. Finalement, je remercie le Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale, la Région Laboratoire du développement durable, et la fondation Gaston Tremblay de l'UQAC pour le support financier apporté durant ces années d'étude.

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	2
1.1. <i>Tendances observées en Europe et en Amérique du Nord</i>	2
1.2. <i>Le réchauffement climatique</i>	3
1.3. <i>Effet du réchauffement climatique sur la croissance des arbres</i>	4
1.4. <i>L'augmentation de la concentration de CO₂ et les dépôts azotés</i>	5
1.5. <i>La sylviculture et les autres activités humaines</i>	6
1.6. <i>Objectifs et hypothèses</i>	7
2. Matériel et méthodes	10
2.1. <i>Plan de sondage</i>	10
2.2. <i>Choix des placettes</i>	13
2.3. <i>Caractérisation écologique de la placette</i>	14
2.4. <i>Choix et mesures des arbres</i>	14
2.5. <i>Mesures en laboratoire</i>	15
2.6. <i>Analyse et traitement des données</i>	16
3. Résultats	18
3.1. <i>Description des peuplements</i>	18
3.1.1. <i>Caractéristiques biophysiques et dendrométriques des peuplements étudiés</i>	18
3.1.2. <i>Caractéristiques dendrométriques des arbres dominants</i>	23
3.2. <i>Largeur moyenne de cerne au dhp</i>	27
3.2.1. <i>Comparaison des patrons de largeur moyenne de cerne au dhp en fonction de l'âge cambial</i>	27
3.2.2. <i>Largeur moyenne de cerne au dhp en fonction de l'année calendaire</i>	31
3.3. <i>Rayon moyen au dhp</i>	35
3.3.1. <i>Comparaison des patrons de rayon moyen au dhp en fonction de l'âge cambial</i>	35
3.4. <i>Accroissement en hauteur</i>	40
3.4.1. <i>Comparaison des patrons d'accroissement en hauteur en fonction de l'âge cambial</i>	40
3.4.2. <i>Accroissements en hauteur en fonction de l'année calendaire</i>	45
3.5. <i>Hauteur moyenne</i>	48
3.5.1. <i>Comparaison des patrons d'accroissement en hauteur en fonction de l'âge cambial</i>	48

3.6. Accroissement en volume	52
3.6.1. Comparaison des patrons d'accroissement en volume en fonction de l'âge cambial	52
3.6.2. Accroissements en volume en fonction de l'année calendaire	57
3.7. Volume moyen	60
3.7.1. Comparaison des patrons d'accroissement en volume en fonction de l'âge cambial	60
3.8. Synthèse des paramètres analysés	65
4. Discussion	67
4.1. Les tendances à long terme de la croissance	68
4.2. Le CO ₂ et les dépôts azotés	69
4.3. La compétition inter et intra-spécifique	71
4.3.1. Dominances des tiges échantillonnées	72
4.3.2. Impact des épidémies de TBE sur la croissance au stade adulte	73
4.4. Le climat	74
4.5. Période d'installation des peuplements échantillonnés	76
4.6. Installation en périodes d'épidémies de TBE	77
4.7. Autres facteurs	81
5. Conclusion	84
6. Références	87

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation géographique des placettes.	12
Figure 2. Largeur moyenne de cerne au dhp (mm), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires.	29
Figure 3. Largeur moyenne de cerne au dhp (mm), écarts-types et nombre d'individus en fonction de la date calendaire pour les différentes paires.	33
Figure 4. Rayon moyen au dhp (mm), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires.	37
Figure 5. Accroissement en hauteur moyen (m), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires.	42
Figure 6. Accroissement en hauteur moyen (m), écarts-types et nombre d'individus en fonction de la date calendaire pour les différentes paires.	46
Figure 7. Hauteur moyenne (m), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires.	50
Figure 8. Accroissement en volume moyen (m^3), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires.	54
Figure 9. Accroissement en volume moyen (m^3), écarts-types et nombre d'individus en fonction de la date calendaire pour les différentes paires.	58
Figure 10. Volume moyen par arbre (m^3), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires.	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Coordonnées géographiques des placettes.	11
Tableau 2. Caractéristiques biophysiques des peuplements étudiés.	19
Tableau 3. Résultats des analyses de sol.	20
Tableau 4. Caractéristiques dendrométriques des peuplements étudiés.	22
Tableau 5. Caractéristiques dendrométriques des arbres dominants (âges et dates d'installation).	25
Tableau 6. Caractéristiques dendrométriques des arbres dominants (paramètres de croissance moyens).	26
Tableau 7. Synthèse des paramètres analysés en fonction des paires de peuplement et des patrons de croissance.	65
Tableau 8. Épidémies de la TBE et période d'établissement des peuplements.	80

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1. Introduction

1.1. *Tendances observées en Europe et en Amérique du Nord*

Plusieurs études réalisées un peu partout sur la planète rapportent une tendance à l'augmentation de la productivité des forêts depuis la fin du 19^e siècle, particulièrement en Europe (Becker *et al.*, 1995; Jacoby *et al.*, 1996).

Sur le territoire européen, plusieurs résultats montrent une tendance à l'augmentation de la productivité des forêts à long terme au cours du siècle dernier pour plusieurs espèces couvrant une grande amplitude géographique (Hari *et al.*, 1984; Becker *et al.*, 1990; Kauppi *et al.*, 1992; Bert, 1992; Briffa, 1992; Eriksson et Johansson, 1993; Badeau *et al.*, 1995; Becker *et al.*, 1995; Spiecker *et al.*, 1996; Vaganov, 1996). Ces recherches étaient réalisées généralement dans des forêts aménagées par l'homme depuis quelques siècles.

En Amérique du nord, dans des forêts naturelles (i.e. non-aménagées par l'humain) des résultats similaires ont été observés dans l'Ouest américain dans des écosystèmes forestiers alpins en zone tempérée (Lamarche *et al.*, 1984; Graumlich *et al.*, 1989; Peterson *et al.*, 1990), en forêts boréales de l'Ouest canadien (Jozsa et Powell, 1987), et dans la toundra arctique et subarctique du nord du Canada et du Québec (Payette *et al.*, 1985; d'Arrigo *et al.*, 1987; d'Arrigo *et al.*, 1992; Lavoie et Payette, 1992; Lavoie et Payette, 1994; Payette et Delwaide, 1994). Cependant, Schweingruber *et al.*, 1993, sur des échantillons d'arbres prélevés dans la ceinture coniférière de l'Alaska au Labrador, ne rapportent aucune augmentation significative de la largeur de cernes, et par conséquent de la croissance depuis le 19^e siècle. Ces résultats, de même que

ceux d'autres travaux (d'Arrigo *et al.*, 1992), indiquent qu'une augmentation de la croissance au cours du 20^e siècle n'est pas une caractéristique générale de la forêt boréale à l'échelle de l'Amérique du Nord.

Au Québec, quelques études réalisées à la limite des arbres dans la toundra arctique et subarctique rapportent une augmentation de la croissance radiale, de la croissance en hauteur et un changement dans la forme de croissance sur des épinettes noires depuis la fin du Petit âge glaciaire (1570-1880) (Payette *et al.*, 1985; Lavoie et Payette, 1992; Lavoie et Payette, 1994; Payette et Delwaide, 1994). Ces changements résulteraient d'hivers plus doux et plus neigeux depuis le milieu du 19^e siècle. En forêt boréale québécoise, aucune recherche déjà réalisée ne fait état d'une tendance à l'augmentation de la croissance des arbres à long terme. Par contre, une étude portant sur la croissance juvénile de l'épinette noire en forêt boréale du nord-ouest du Lac St-Jean suggère qu'une augmentation de la croissance en hauteur de semis d'épinette noire établis au 20^e siècle atteint le double de la croissance juvénile des arbres mères établis au 19^e siècle (Fantin, 1999).

Quatre causes peuvent expliquer ces tendances à long terme (Badeau *et al.*, 1995) : des changements climatiques (augmentation des précipitations ou de la température), une augmentation de la concentration de CO₂ atmosphérique, les conséquences de la pollution (par la fertilisation azotée) ou une augmentation de la productivité causée par la sylviculture.

1.2. *Le réchauffement climatique*

Depuis le 19^e siècle, les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre ont considérablement augmenté en raison de l'accroissement des émissions

causées par l'activité humaine. Cela a entraîné une intensification de l'effet de serre. Les concentrations de dioxyde de carbone ont augmenté de 28% au cours des 200 dernières années. Les scientifiques prévoient que la quantité de CO₂ dans l'atmosphère sera deux fois plus grande d'ici 40 ans (Environnement Canada, 1996).

La température moyenne au Canada a augmenté de 1,1 °C au cours du dernier siècle. Bien qu'en général le climat se soit réchauffé au Canada, des écarts régionaux sont évidents. Par exemple, la côte Est du Canada a connu un refroidissement général depuis 1950 environ (Environnement Canada, 1996).

Pour la majorité des régions du Québec, on n'observe pas de variation de la température annuelle moyenne durant la période 1961-1990 (Gouvernement du Québec, 1996). Durant la période 1895-1992, la température maximale n'a pas augmenté significativement sur l'ensemble du Québec (0,1 °C à 0,2 °C). Par contre, la température minimale a augmenté de manière significative de 1,0 °C à 1,1 °C sur la vaste majorité du territoire. Les variations de précipitations, dont les répartitions sont plus sensibles aux conditions locales, sont plus difficiles à discerner, bien que les tendances semblent à la hausse au Québec.

1.3. Effet du réchauffement climatique sur la croissance des arbres

Les connaissances sur de possibles effets d'un réchauffement climatique sur l'écosystème forestier boréal proviennent en grande partie de modèles écophysiologiques ou bioclimatiques développés sous différents scénarios (Lamhamadi et Bernier, 1994). En général, ces modèles prédisent une augmentation du taux de cyclage des éléments en forêt boréale, un mouvement général des espèces vers des latitudes plus nordiques et une augmentation de l'occurrence des feux de forêts (Lamhamadi et Bernier, 1994). Tous les modèles

biophysiques de circulation globale, même s'ils sont imparfaits, prédisent que les régions boréales seront plus chaudes et plus sèches (Lamhamedi et Bernier, 1994).

Les changements climatiques et environnementaux, passés, actuels et futurs, peuvent avoir des conséquences importantes sur la croissance des arbres et des peuplements forestiers. Les influences du climat sur la croissance peuvent varier selon les espèces, le statut social et les conditions des sites. La température influence la longueur de la saison de croissance (Spiecker *et al.*, 1996). Des effets plus évidents sur la croissance sont notés lors d'événements climatiques comme un gel tardif, une sécheresse estivale, ou lors de changements abrupts de température. De tels événements surviennent parfois au niveau local et ne sont pas inclus dans les variables climatiques généralement disponibles. Les écosystèmes forestiers ont toujours été exposés aux changements environnementaux dans le temps, et ce, même sans l'influence des activités humaines (Spiecker, 1995). Dans ce contexte, les écosystèmes forestiers peuvent servir de bio-indicateurs (Spiecker *et al.*, 1996).

1.4. L'augmentation de la concentration de CO₂ et les dépôts azotés

Une augmentation de la concentration de CO₂ peut stimuler la photosynthèse, réduire la respiration et soulager les stress hydriques et de basse luminosité (Spiecker *et al.*, 1996). L'augmentation des concentrations de CO₂ depuis le siècle dernier pourrait expliquer en partie les différences de croissance observées dans la littérature. Tel que mentionné précédemment, les concentrations de dioxyde de carbone ont augmenté de 28% au cours des 200 dernières années à l'échelle planétaire (Environnement Canada, 1996).

L'azote est reconnu comme un important élément nutritif pour la croissance des plantes. Une autre hypothèse pouvant expliquer une augmentation de la productivité depuis le siècle dernier, surtout en Europe, est l'augmentation des dépôts azotés. Comme les concentrations de CO₂, les dépôts azotés est un autre facteur susceptible d'avoir évolué brusquement depuis quelques décennies en Europe (Badeau, 1995). Ces dépôts seraient de faible importance sous les hautes latitudes (Erisman, 1989 *in* Badeau, 1995), mais ils auraient brutalement augmenté en Europe Centrale à partir de 1950 (Lövblad et Erisman, 1992 *in* Badeau, 1995). En Amérique du Nord, en forêt boréale, il existe une dizaine de points de mesure qui montrent bien que les niveaux de dépôts azotés sont très faibles (moins de 5 kgN/ha/an) (Jean-Luc Dupouey, communication personnelle), beaucoup plus faibles que ceux observés en Europe (de 5 à plus de 50 kgN/ha/an) (Badeau, 1995).

1.5. *La sylviculture et les autres activités humaines*

Les activités humaines influencent de plus en plus l'environnement (Specker *et al.*, 1996). Des changements dans la composition de la litière dus au raclage de la terre, le broutage par les animaux d'élevages de même que l'historique de l'aménagement du territoire forestier (incluant les méthodes de régénération, de contrôle de la végétation compétitrice, d'abattage, d'éclaircie des peuplements, et leurs effets sur les ressources génétiques, sur la composition en espèce, sur la structure d'âge et sur la structure de la forêt en elle-même) peuvent avoir des répercussions considérables sur les conditions de station.

1.6. *Objectifs et hypothèses*

Les causes multiples de l'augmentation de la croissance des arbres ne peuvent être séparées en Europe. D'une part, les effets fertilisants de l'augmentation des dépôts azotés, amenés par la pollution atmosphérique, et du CO₂ atmosphérique ont joué de façon concomitante. D'autre part, l'impact humain, omniprésent depuis très longtemps dans ces forêts, peut avoir des conséquences analogues aux changements environnementaux. La forêt boréale naturelle du Québec offre un environnement permettant de minimiser ces problèmes : absence d'intervention humaine et de pollution azotée.

Cette présente recherche a pour but d'étudier l'évolution de la productivité en forêt boréale naturelle au cours du siècle dernier, en comparant la croissance radiale, en hauteur et en volume d'épinettes noires âgées avec celle de jeunes épinettes noires. Il s'agit de confirmer ou d'infirmer l'existence d'une dérive positive de la croissance depuis le siècle dernier.

L'analyse de tige permet la reconstruction de la croissance en diamètre et en hauteur (et par conséquent du volume) sur de longues périodes de temps avec une résolution qui est annuelle (Speecker *et al.*, 1996). Toutefois, la densité des peuplements et l'âge ont un effet sur la croissance de chaque arbre (Speecker, 1992). L'effet de la densité est moins prononcé sur des individus dominants, même si la croissance de ceux-ci a été affectée par leurs voisins (Speecker, 1992 ; Kotar, 1996).

La hauteur dominante est une des meilleurs caractéristiques pour évaluer la productivité d'un peuplement (Mielikänen et Timonen, 1996). La croissance en hauteur est moins influencée par les effets de la compétition (Speecker *et al.*, 1996). La hauteur dominante d'un peuplement dépend principalement de l'âge et

de la fertilité de la station (incluant les facteurs climatiques et pédologiques) (Jean-Luc Dupouey, communication personnelle). C'est ce qui a été formulé en Europe sous le nom de loi de Eichhorn établie en 1904 (Montero *et al.*, 1996).

L'analyse des cernes annuels est appropriée pour détecter les fluctuations à court et moyen terme de la croissance de l'arbre (Spiecker *et al.*, 1996). L'analyse de la croissance en hauteur serait préférable pour des observations à long terme (Spiecker *et al.*, 1996). Une combinaison de plusieurs types de données et de variables caractérisant la croissance donnerait les meilleurs résultats (Spiecker *et al.*, 1996).

La croissance en volume intègre à la fois la croissance radiale et la croissance en hauteur. Ces dernières sont des mesures de croissance dans une seule dimension (i.e. verticale ou horizontale), cette croissance découle de l'activité méristématique apicale ou cambiale (Lussier, 1991). L'accroissement en volume est plutôt une mesure tridimensionnelle de la croissance d'un arbre, résultant à la fois de l'activité du cambium et de l'accroissement de la surface cambiale (Lussier, 1991).

Contrairement à l'Europe où les superficies boisées sont limitées et aménagées intensivement, la forêt boréale naturelle québécoise offre un réservoir énorme d'arbres. L'abattage d'arbres pour des fins scientifiques est donc moins restrictif, bien que contrôlé par les autorités compétentes.

CHAPITRE 2

MATERIEL ET METHODES

2. Matériel et méthodes

Des échantillons ont été prélevés à l'été 1995 et 1996 dans 20 placettes regroupées dans 10 paires : un peuplement jeune (âge moyen de 65 ans) et un peuplement âgé (âge moyen de 175 ans). Les placettes composant une paire sont à peu de distance l'une de l'autre et sont situées sur un type de station similaire. Cinq arbres dominants dans chaque placette ont été abattus et leur croissance passée reconstruite par analyse de tige.

Cette étude utilise des peuplements naturels d'épinette noire à structure régulière et équienne issus de régénération naturelle après feu. L'épinette noire a été choisie en raison de son abondance. De plus, sa dynamique est un peu moins sensible que le sapin baumier aux attaques d'insectes. La méthode employée est décrite plus en détails dans les paragraphes qui suivent.

2.1. *Plan de sondage*

Les placettes ont été choisies dans la région forestière boréale (sections forestières de Laurentide-Onatchiway et de Chibougamau-Natashquan) (Rowe, 1972). La zone prospectée est relativement étroite en latitude (figure1, tableau 1). En effet, les chemins forestiers s'arrêtent en général au front de coupe actuel. On ne dispose donc pour l'échantillonnage en forêt naturelle que d'une bande de quelques dizaines de kilomètres dans laquelle les chemins forestiers sont déjà construits, mais où l'exploitation forestière n'a pas encore débuté (de un à trois ans de chemins d'avance).

Les points d'échantillonnage ont été retenus au préalable d'après les critères décrits dans cette présente section, en s'appuyant sur les cartes forestières au

1 : 20 000 du Ministère des ressources naturelles du Québec (MRNQ) et les cartes d'historique des feux du MRNQ. Les systèmes d'information à référence spatiale des différentes compagnies forestières de la région concernée ont également été mis à profit afin de trouver des peuplements se prêtant à l'échantillonnage.

Tableau 1. Coordonnées géographiques des placettes.

Placette	Latitude	Longitude
1	49° 52' 55" N	70° 42' 17" W
3	49° 53' 59" N	70° 41' 32" W
4	49° 55' 25" N	70° 38' 17" W
5	49° 54' 57" N	70° 39' 51" W
6	50° 07' 21" N	71° 03' 31" W
8	50° 09' 14" N	71° 03' 19" W
9	50° 00' 23" N	71° 52' 45" W
10	50° 02' 51" N	71° 54' 26" W
11	50° 00' 48" N	71° 53' 09" W
12	50° 00' 37" N	71° 53' 12" W
13	50° 10' 15" N	72° 02' 59" W
14	50° 10' 09" N	72° 02' 53" W
23	49° 46' 10" N	73° 07' 44" W
24	49° 46' 13" N	73° 07' 40" W
30	49° 44' 32" N	69° 29' 01" W
31	49° 44' 04" N	69° 29' 33" W
32	49° 41' 30" N	69° 29' 20" W
33	49° 41' 42" N	69° 29' 18" W
34	49° 42' 50" N	69° 26' 49" W
35	49° 43' 04" N	69° 25' 51" W

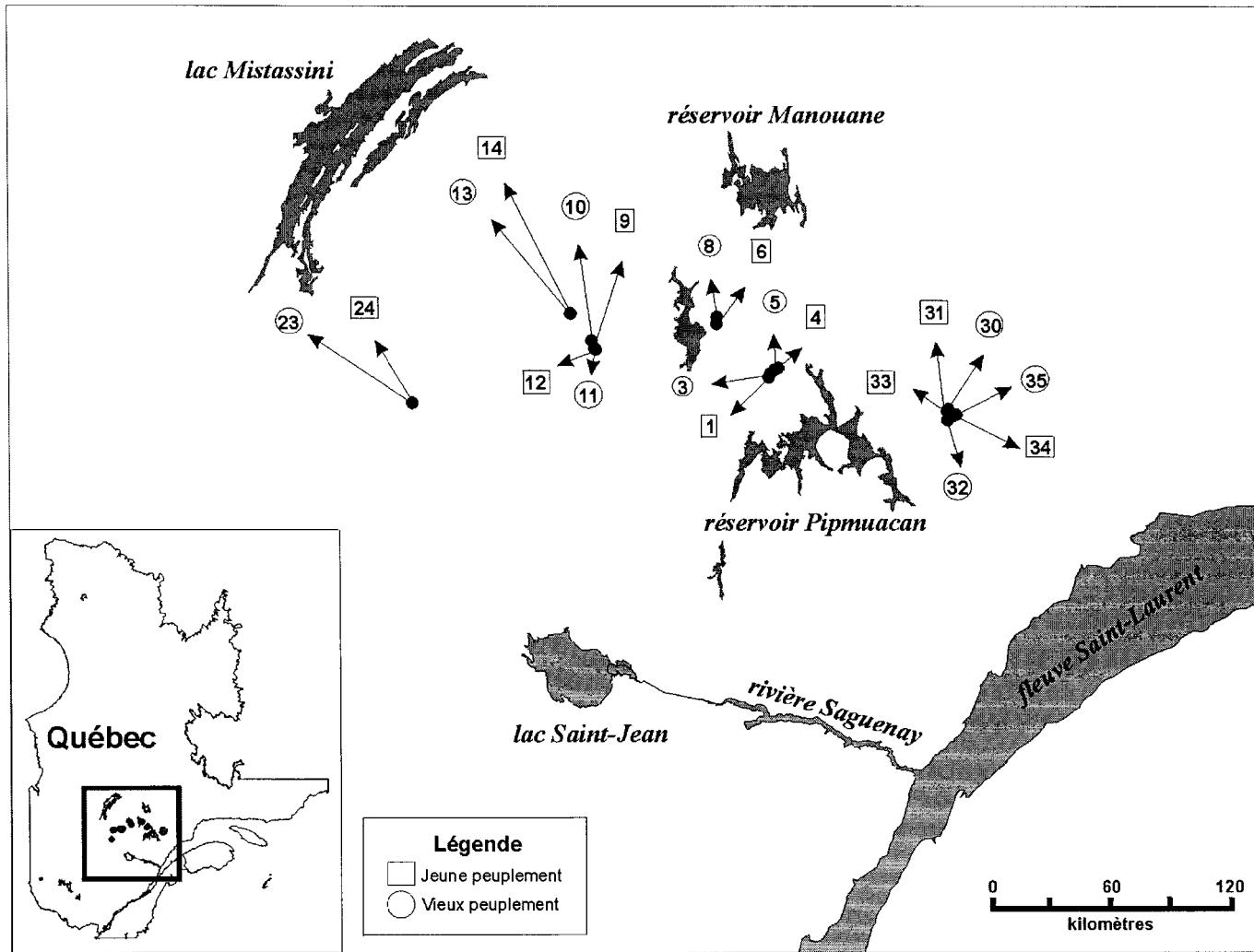


Figure 1. Localisation géographique des placettes.

2.2. *Choix des placettes*

Plusieurs critères de sélection ont été appliqués dans le choix des placettes sur le terrain. Les placettes ont été réalisées sur un type de milieu mésique, ni trop humide, ni trop sec. Les situations écologiques extrêmes ont été éliminées. De plus, les échantillons ont été prélevés dans des peuplements de densité normale. Les peuplements de densité trop faible ont également été exclus car ils sont plutôt représentatifs des régions situées plus au nord (forêt-parc d'épinettes noires sur lichens pâles). Les pessières à cladonie (peuplements d'épinette noire situés sur lichens pâles) ou les pessières ouvertes à éricacée ont été évitées. En effet, les lichens et éricacées ont pu être en compétition avec les épinettes noires lors de leur croissance juvénile. Les peuplements ayant des perturbations importantes visibles, tels les chablis, les arbres affectés sévèrement par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clem.) ou autres éléments perturbateurs ont eux aussi été éliminés de l'échantillonnage. Enfin, les peuplements et les individus issus de marcottes ont été exclus, car ils présentent des problèmes de variabilité de croissance initiale.

Les paires de placettes d'âges différents ont été sélectionnées à peu de distance l'une de l'autre, à moins de 1 à 2 kilomètres. Elles devaient également être accessibles en voiture. Les écotones ont été évités afin de contrer l'effet de bordure. Les placettes ont été délimitées à la boussole et avec un décamètre. Elles sont de forme rectangulaire de 30 m par 20 m soit 600 m² de surface. Les placettes ont été localisées à la peinture par marquage des arbres limitrophes d'une croix au pied de l'arbre.

2.3. *Caractérisation écologique de la placette*

Les deux peuplements de la paire (jeune et âgé) doivent être impérativement sur le même type de milieu (substrat, exposition, topographie, couvert, sol, humidité, végétation herbacée, etc.). L'homogénéité des deux peuplements a été vérifiée. La tarière pédologique a été utilisée afin de s'en assurer. Une description topographique, un relevé floristique sommaire, une description d'un profil de sol et un prélèvement dans la couche LFH (dans 14 placettes seulement, toutes situées au nord du Lac St-Jean) ont été réalisés. Plusieurs relevés pédologiques ont été faits dans les 14 placettes et aux alentours car la variabilité dans les premiers centimètres du sol est grande sur une superficie restreinte.

Si deux peuplements, jeune et âgé, se côtoient, c'est parce qu'un feu s'est arrêté à cet endroit. Un changement de milieu (début de tourbière humide par exemple) peut en être la cause. Ce cas a dû être évité, puisque les deux peuplements n'étaient pas sur un même type de milieu puisqu'ils n'avaient pas le même drainage.

2.4. *Choix et mesures des arbres*

Un inventaire des diamètres à hauteur de poitrine (dhp) de tous les arbres a été effectué dans chaque placette. Cinq arbres dominants, présentant les plus gros diamètres dans la placette, ont été abattus et des sections d'environ 2,5 cm d'épaisseur ont été prélevées à intervalles réguliers. Les sections ont été prélevées aux hauteurs suivantes : 0 m, 0,3 m, 0,6 m, 1 m, 1,3 m, puis à tous les mètres, jusqu'au sommet de l'arbre. Le niveau zéro est celui du sol, ou, en cas de sol organique, de la mousse. La hauteur totale et le dhp de chaque arbre ont été notés avant le prélèvement des rondelles. Lorsque les arbres présentaient une ou

plusieurs fourches importantes, toutes les branches ont été prélevées et incluses dans les calculs de croissance.

2.5. *Mesures en laboratoire*

Au laboratoire, la datation des cernes est réalisée sur chaque rondelle. Cette datation se fait rétrospectivement depuis l'écorce, en travaillant avec la loupe binoculaire. La mesure des cernes de croissance est réalisée à l'aide d'un lecteur optique (scanner) couplé au logiciel MacDENDRO™. Les rondelles dont la lecture des cernes était difficile ont été traitées avec une loupe binoculaire grossissante couplée au logiciel MacTRIM™. Ces logiciels font la lecture des largeurs de cerne pour chaque année présente sur une rondelle donnée. La lecture des cernes de croissance de la plupart des rondelles a été effectuée sur deux rayons. Toutefois, celle-ci a été réalisée quelques fois sur quatre rayons quand les rondelles présentaient une forme irrégulières (ovale ou difforme).

Par la suite, l'interdatation a été effectuée à l'aide du programme COFECHA (Holmes, 1983). Au départ, les sections d'une même tige ont été interdatées entre-elles. Puis, la courbe moyenne des largeurs de cernes de chacune des tiges a été comparée aux autres tiges de la même placette. Puis, au fur et à mesure que les tiges étaient interdatées, elles étaient ajoutées à une moyenne globale des arbres de toutes les placettes. Cette moyenne globale était utilisée pour interdater les autres tiges restantes.

2.6. *Analyse et traitement des données*

La croissance des tiges a été obtenue à l'aide d'un programme d'analyse de tige développé sur SAS®, en utilisant la fonction Carmean pour la hauteur (Dyer et Bailey, 1987) et la sommation des troncs de cônes pour le volume.

CHAPITRE 3

RESULTATS

3. Résultats

3.1. *Description des peuplements*

3.1.1. Caractéristiques biophysiques et dendrométriques des peuplements étudiés

Les caractéristiques biophysiques des peuplements étudiés sont décrites dans le tableau 2. Les deux peuplements constituant chacune des paires avaient généralement des caractéristiques biophysiques semblables. Par contre, deux paramètres variaient selon les peuplements à l'intérieur d'une même paire, soit la position topographique et le régime hydrique. La position topographique des peuplements était plus variable, six paires sur 10 ayant des positions topographiques différentes (1-3, 4-5, 9-10, 13-14, 32-33 et 34-35), et une paire ayant des données incomplètes pour les fins de la comparaison (23-24). Conséquemment, le régime hydrique était lui aussi variable, mais dans une moindre importance, 2 paires ayant des régimes hydriques différents (9-10 et 34-35), et 2 autres paires n'ayant aucune donnée pour les fins de la comparaison. Des échantillons de sol ont été prélevés dans tous les peuplements, à l'exception de ceux situés dans la région de la Côte-Nord (tableau 3). Les analyses ont révélé que tous les peuplements croissaient sur des sols peu fertiles, typiques des régions boréales. Aucun taux anormalement élevé d'azote n'a été détecté.

Les épinettes noires étudiées ont été récoltées dans des pessières noires presque pures. Des tiges marchandes (9 cm et plus au dhp) de sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) et de bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.) étaient parfois présentes, mais dans de faibles proportions. La présence de tiges marchandes de peupliers faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.), de pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.), de mélèzes laricin (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch) et de

Tableau 2. Caractéristiques biophysiques des peuplements étudiés.

Peuplement	Groupe d'âge (Jeune ou Vieux)	Pente (%)	Exposition	Position topographique	Régime hydrique	Dépôt de surface	Ordre ou grand groupe de sol	Type d'humus
1	Jeune	5	sud-ouest	bas de pente	sec à frais	fluviatile	podzol humo-ferrique	mor
3	Vieux	0	aucune	sommet	sec	n.d.	podzolique	mor
4	Jeune	8	sud-sud-ouest	mi-pente	humide à très humide	fluvioglaciaire	n.d.	mor
5	Vieux	13	sud-ouest	bas de pente	humide à très humide	fluvioglaciaire	podzol humique	n.d.
6	Jeune	40	ouest	mi-pente	très sec à sec	fluvioglaciaire	podzol humo-ferrique	mor
8	Vieux	45	nord-ouest	mi-pente	n.d.	till indifférencié épais	n.d.	n.d.
9	Jeune	12	sud-ouest	bas de pente	très sec à sec	till indifférencié épais	podzolique	mor
10	Vieux	faible	aucune	mi-pente	très humide	n.d.	n.d.	mor
12	Jeune	5	nord-ouest	bas de pente	sec	Fluviatile	n.d.	mor
11	Vieux	n.d.	n.d.	bas de pente	sec	Fluviatile	n.d.	mor
14	Jeune	40	est	bas de pente	frais	fluvioglaciaire	n.d.	mor
13	Vieux	30	est	mi-pente	frais	fluvioglaciaire	n.d.	n.d.
23	Jeune	0	aucune	bas de pente	très humide	n.d.	n.d.	mor
24	Vieux	5	ouest	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
31	Jeune	5	sud-est	mi-pente	sec	till indifférencié mince	podzol humo-ferrique	mor
30	Vieux	5	sud	mi-pente	sec	till indifférencié mince	podzol humo-ferrique	mor
33	Jeune	10	sud	mi-pente	sec	till indifférencié mince	podzol humo-ferrique	mor
32	Vieux	5	sud	bas de pente	sec	till indifférencié mince	podzol humo-ferrique	mor
34	Jeune	0	aucune	plat	sec	fluvioglaciaire	podzol humo-ferrique	mor
35	Vieux	5	aucune	bas de pente	très humide	fluvioglaciaire	podzol humo-ferrique	mor

Tableau 3. Résultats des analyses de sol.

Variable	Peuplement												Moyenne	
	1	3	4	5	6	8	9	10	11	12	14	23	24	
pH eau	3,4	2,9	3,9	4,7	2,9	3,1	3,2	3,7	4,3	3,9	3,6	3,8	4,4	3,7
pH tampon	3,4	3,5	4,2	4,5	3,7	3,6	3,6	3,8	4,2	3,7	3,8	3,7	4,2	3,8
Matière organique (%)	57,3	47,5	66,6	72,1	74,6	48,2	65,4	71,7	69,8	58,4	85,1	74,0	73,3	66,5
Carbone/azote	55,39	55,10	29,72	32,17	39,34	29,43	39,93	26,83	27,92	37,64	42,92	23,85	30,37	36,20
Phosphore (kg/ha)	65	49	72	34	59	49	65	49	40	40	40	26	26	47
Potassium (kg/ha)	143	173	496	41	175	382	224	135	134	154	220	34	54	182
Calcium (kg/ha)	1105	258	448	2284	1420	390	441	327	854	1048	528	2263	4978	1257
Magnesium (kg/ha)	149	83	199	282	235	208	234	92	202	267	118	348	596	232
C.E.C.	40,08	37,08	32,01	33,19	38,44	37,18	37,21	34,53	32,51	37,71	35,17	40,58	43,09	36,83
Saturation en K (%)	0,41	0,53	1,77	0,14	0,52	1,18	0,69	0,45	0,47	0,47	0,72	0,10	0,14	0,58
Saturation en Ca (%)	6,15	1,55	3,12	15,36	8,25	2,34	2,65	2,11	5,86	6,20	3,35	12,45	25,79	7,32
Saturation en Mg (%)	1,38	0,83	2,31	3,16	2,27	2,08	2,34	0,99	2,31	2,63	1,25	3,19	5,14	2,30
Saturation totale (%)	7,94	2,91	7,20	18,66	11,04	5,60	5,68	3,55	8,64	9,30	5,32	15,74	31,07	10,20
Azote total (%)	0,60	0,50	1,30	1,30	1,10	0,95	0,95	1,55	1,45	0,90	1,15	1,80	1,40	1,15
Aluminium (ppm)	514,0	493,0	966,0	1536,0	442,0	763,0	391,0	580,0	1005,0	923,0	743,0	448,0	901,0	746,5

cerisiers de pensylvanie (*Prunus pensylvanica* L.f.) était notée dans quelques peuplements. La régénération (moins de 9 cm au dhp) de ces peuplements était principalement composée de jeunes sapins baumiers, avec des bouleaux à papier et des marcottes d'épinettes noires, dans de plus faibles proportions.

Les caractéristiques dendrométriques des peuplements étudiés sont décrites au tableau 4. Ces caractéristiques ont été évaluées à l'intérieur de placettes-échantillon de 600 m². La surface terrière des peuplements les plus âgés était supérieure pour toutes les paires, à l'exception de la paire 32-33 dont les peuplements présentaient des surfaces terrières semblables, de la paire 30-31 où la surface terrière est plus élevée dans le jeune peuplement, et de la paire 23-24 où des données étaient manquantes pour les fins de la comparaison. Les jeunes peuplements avaient une densité plus élevée que les peuplements plus âgés, à l'exception des paires 1-3 et 9-10 où les peuplements les plus âgés avaient la plus forte densité, et de la paire 23-24 où des données étaient manquantes pour les fins de la comparaison. Le diamètre moyen au dhp était plus élevé pour les peuplements les plus âgés à l'intérieur d'une paire, à l'exception de la paire 1-3 dont les diamètres moyens étaient à peu près semblables, et de la paire 23-24 où des données étaient manquantes pour les fins de la comparaison.

Tableau 4. Caractéristiques dendrométriques des peuplements étudiés.

Peuplement	Groupe d'âge (Jeune ou Vieux)	Densité ¹ (tiges/ha)	Proportion ¹ occupée par les épinettes noires (%)	Diamètre ¹ moyen au dhp (cm)	Surface terrière ¹ (m ² /ha)
1	Jeune	600	100	15,2	11,95
3	Vieux	1183	100	15,9	25,26
4	Jeune	2050	97	13,2	29,79
5	Vieux	1833	100	16	39,37
6	Jeune	2167	92	14	35,73
8	Vieux	1417	94	18,2	40,14
9	Jeune	750	95	14,7	13,65
10	Vieux	1950	94	17,3	55,93
12	Jeune	1417	93	12,4	18,12
11	Vieux	1317	100	18,2	36,15
14	Jeune	2050	98	11,2	20,79
13	Vieux	1267	93	17,5	32,13
23	Jeune	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
24	Vieux	1250	97	13,8	20,05
31	Jeune	2983	97	10,9	28,64
30	Vieux	1150	93	15,2	22,3
33	Jeune	3067	92	12,7	41,04
32	Vieux	1433	88	18,8	42,74
34	Jeune	2750	94	10,6	25,02
35	Vieux	1450	77	18,3	41,32

¹Seules les tiges marchandes (arbres ayant 9 cm et plus au dhp) ont été inventoriées.

3.1.2. Caractéristiques dendrométriques des arbres dominants

La description des caractéristiques dendrométriques des arbres sélectionnés pour chaque peuplement (arbres dominants) est présentée aux tableaux 5 (âges et dates d'installation) et 6 (paramètres de croissance moyens). Ces caractéristiques proviennent des données prises sur le terrain et des analyses de tige effectuées en laboratoire.

La date d'installation la plus ancienne est l'année 1754 (peuplement 11) et la plus récente est 1961 (peuplement 23). Conséquemment, le peuplement 11 contient l'arbre dominant le plus âgé avec 241 ans et le peuplement 23 contient le plus jeune arbre dominant avec 32 ans. L'âge des arbres dominants des vieux peuplements varie de 119 à 241 ans et celui des jeunes peuplements varie de 34 ans à 84 ans.

L'âge le plus jeune qui a pu être analysé jusqu'au cœur dans chaque placette est présenté au tableau 5 afin de démontrer l'homogénéité des âges dans chaque placette. Le peuplement 13 présente l'écart d'âge le plus important avec 36 ans et le peuplement 23 contient l'écart d'âge le moins important entre le plus vieil arbre et le plus jeune arbre avec 2 ans.

Le diamètre moyen au dhp, la hauteur moyenne et le volume moyen des arbres dominants des peuplements plus âgés sont toujours supérieurs à ceux des peuplements les plus jeunes et ce, pour toutes les paires. Par contre, la largeur de cerne moyenne de même que l'accroissement en hauteur moyen des arbres dominants des peuplements plus jeunes sont toujours supérieurs à ceux des peuplements les plus vieux et ce, pour toutes les paires.

Toutefois, l'accroissement en volume moyen des arbres dominants varie selon les peuplements à l'intérieur d'une même paire. L'accroissement en volume moyen

des arbres dominants des peuplements était plus variable, cinq paires sur 10 ayant des jeunes peuplements présentant des accroissements en volume moyens supérieurs à celui des vieux peuplements (1-2, 4-5, 6-8, 9-10) ou égaux (30-31). Les arbres dominants des peuplements plus âgés des cinq autres paires présentent des accroissements en volume moyens supérieurs à ceux des jeunes peuplements (11-12, 13-14, 23-24, 32-33 et 34-35).

Tableau 5. Caractéristiques dendrométriques des arbres dominants (âges et dates d'installation).

Peuplement	Groupe d'âge (Jeune ou Vieux)	Date d'installation (date calendaire)	Âge le plus ancien (année)	Âge le plus jeune (année)	Écart d'âge (année)
1	Jeune	1938	57	52	5
3	Vieux	1870	125	118	7
4	Jeune	1939	56	51	5
5	Vieux	1859	136	122	14
6	Jeune	1938	57	53	4
8	Vieux	1871	124	118	6
9	Jeune	1926	69	59	10
10	Vieux	1791	204 ²	195	9
12	Jeune	1927	68	65	3
11	Vieux	1754	241	241	0
14	Jeune	1923	72	67	5
13	Vieux	1770	225	189	36
23	Jeune	1961	34	32	2
24	Vieux	1876	119	110	9
31	Jeune	1913	84	74	10
30	Vieux	1772	225	210	15
33	Jeune	1925	72 ²	69	3
32	Vieux	1839	158	151	7
34	Jeune	1921	76	72	4
35	Vieux	1814	183 ²	177	6

²L'âge de l'arbre le plus vieux de ces peuplements n'a pu être mesuré jusqu'au cœur (moelle) puisque qu'il y avait des cernes manquants ou non analysables (cœur pourri, trou au centre de l'arbre à la souche). L'âge de l'arbre le plus vieux est donc sous-évalué.

Tableau 6. Caractéristiques dendrométriques des arbres dominants (paramètres de croissance moyens).

Peuplement	Groupe d'âge (Jeune ou Vieux)	Diamètre moyen au dhp (cm/tige)	Largeur de cerne moyenne au dhp (mm/an/tige)	Hauteur moyenne (m/tige)	Accroissement en hauteur moyen (m/an/tige)	Volume moyen (m ³ /tige)	Accroissement en volume moyen (m ³ /an/tige)
1	Jeune	21,9	1,76	12,88	0,24	0,166	0,0030
3	Vieux	23,3	0,83	16,78	0,14	0,233	0,0019
4	Jeune	21,0	1,73	13,91	0,26	0,162	0,0031
5	Vieux	24,3	0,85	19,28	0,15	0,310	0,0026
6	Jeune	22,9	1,82	14,57	0,27	0,220	0,0043
8	Vieux	27,8	1,00	20,88	0,17	0,459	0,0038
9	Jeune	22,7	1,54	14,04	0,22	0,183	0,0031
10	Vieux	23,8	0,59	17,80	0,10	0,265	0,0016
12	Jeune	15,4	0,99	14,16	0,21	0,092	0,0014
11	Vieux	25,2	0,54	20,76	0,10	0,371	0,0020
14	Jeune	15,4	0,94	12,26	0,18	0,085	0,0012
13	Vieux	24,3	0,50	20,64	0,10	0,312	0,0016
23	Jeune	9,1	1,17	7,41	0,23	0,020	0,0006
24	Vieux	19,4	0,76	15,99	0,14	0,183	0,0017
31	Jeune	16,0	0,89	13,16	0,17	0,107	0,0015
30	Vieux	21,8	0,50	18,18	0,09	0,265	0,0014
33	Jeune	18,8	1,17	13,88	0,20	0,148	0,0021
32	Vieux	27,0	0,76	22,00	0,14	0,418	0,0027
34	Jeune	14,8	0,88	12,21	0,17	0,082	0,0012
35	Vieux	26,8	0,65	22,79	0,13	0,475	0,0026

3.2. Largeur moyenne de cerne au dhp

Les courbes de largeur moyenne de cerne au dhp ont été réalisées à partir des données d'analyse de tige. Ces courbes représentent la moyenne des largeurs de cerne au dhp des arbres dominants d'un peuplement en fonction de l'âge cambial et de l'année calendaire. Elles sont regroupées selon les paires de peuplements.

3.2.1. Comparaison des patrons de largeur moyenne de cerne au dhp en fonction de l'âge cambial

La figure 2 présente les courbes de largeur moyenne de cerne au dhp des arbres dominants en fonction de l'âge cambial pour chaque paire de peuplements.

Les courbes de largeur moyenne de cerne au dhp des jeunes peuplements et ceux plus âgés à l'intérieur d'une paire ont été classées selon deux patrons distincts, soit :

- A. Courbes relativement semblables pour les deux peuplements d'une paire donnée;
- B. Courbes des jeunes peuplements supérieures à celles des vieux peuplements, mais elles rejoignent celles des vieux peuplements.

A. Les courbes moyennes de largeur de cerne au dhp sont semblables

Les courbes moyennes de largeur de cerne au dhp des paires 6-8, 32-33 et 34-35 sont relativement semblables pour les arbres dominants des jeunes et des vieux peuplements (figure 2). De plus, les courbes et les écarts-types des jeunes et des vieux peuplements se confondent parfaitement, indiquant une croissance relativement semblable. Les peuplements constituant ces paires proviennent de lieux différents et ont des dates d'installation différentes.

La largeur moyenne de cerne au dhp des arbres dominants des jeunes et des vieux peuplements augmente beaucoup durant les 25 premières années, puis diminue lentement par la suite. La croissance en diamètre augmente beaucoup au début, puis se stabilise et tend à diminuer avec l'âge.

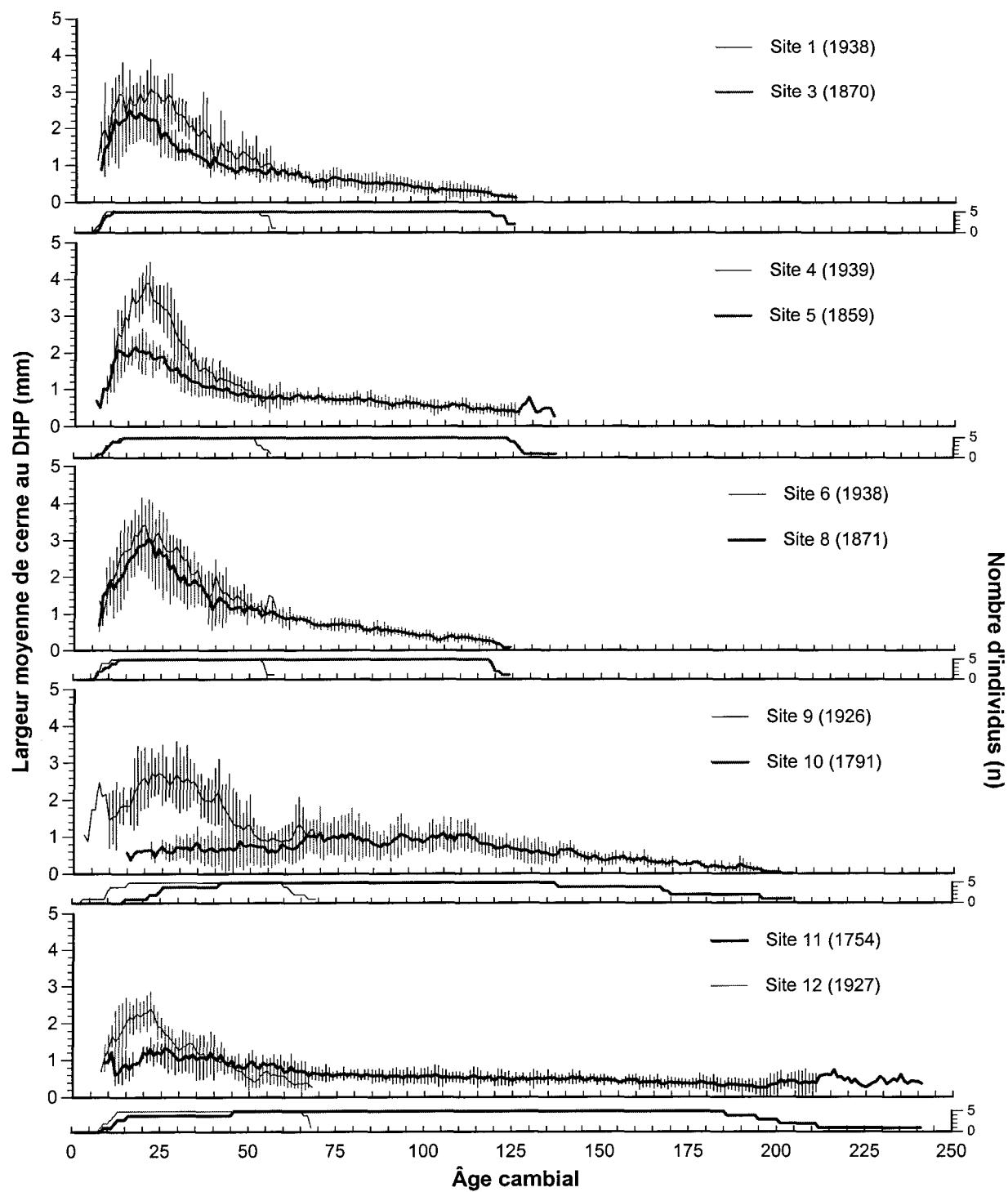


Figure 2. Largeur moyenne de cerne au dhp (mm), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

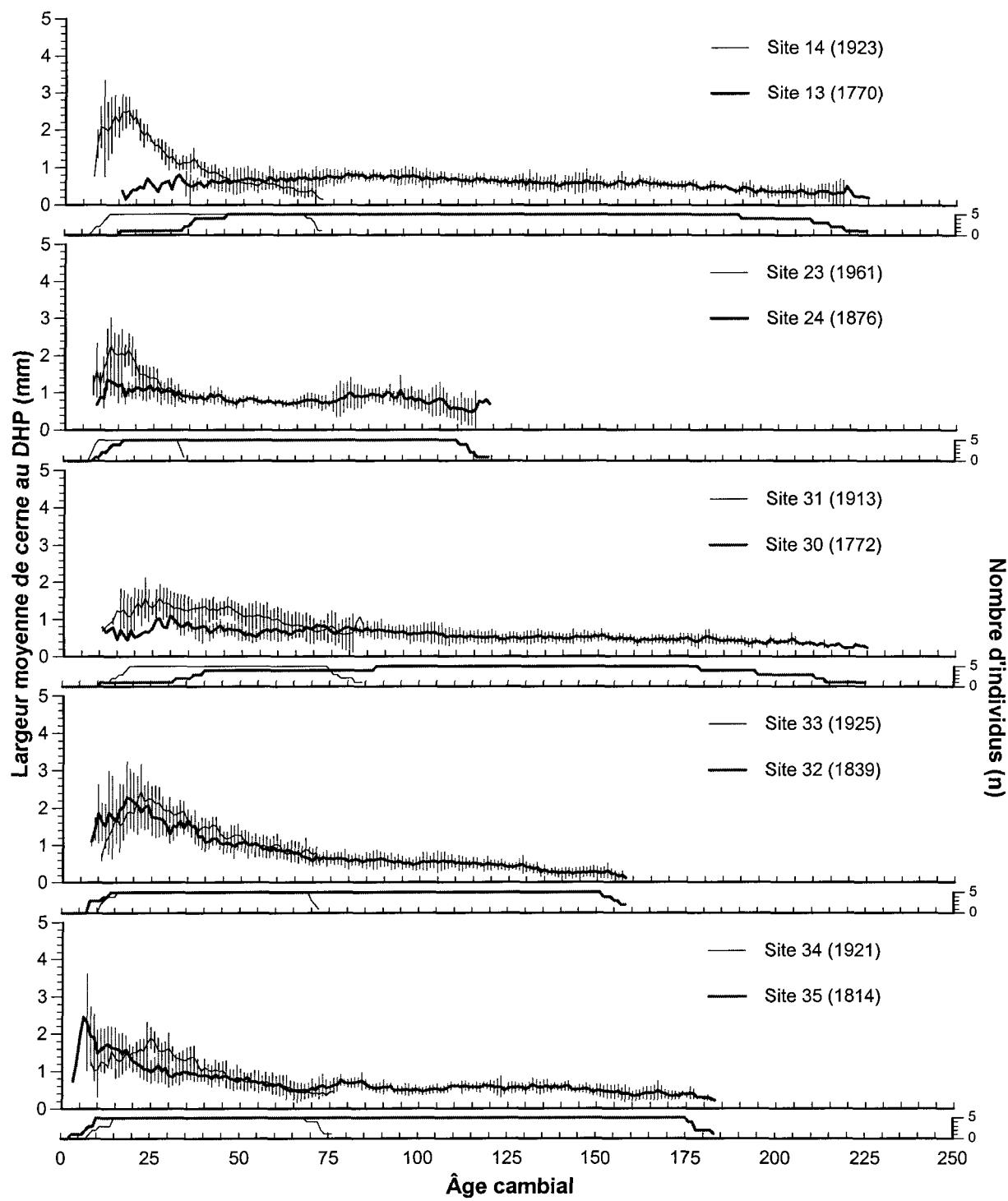


Figure 2 (suite). Largeur moyenne de cerne au dhp (mm), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

C. Les courbes moyennes de largeur de cerne au dhp des jeunes peuplements sont supérieures, mais elles rejoignent celles des vieux peuplements

Les courbes moyennes de largeur de cerne au dhp des arbres dominants des jeunes peuplements pour les paires 1-3, 4-5, 9-10, 11-12, 13-14, 23-24 et 30-31 sont supérieures à celles des vieux peuplements (figure 2), mais elles rejoignent celles des vieux peuplements. Les écarts-types de chaque paire de ce groupe ne se recouvrent pas indiquant une croissance différente, sauf pour les paires 1-3, 23-24 et 30-31 où les écarts-types s'entrecroisent. Les peuplements constituant ces paires sont situés au nord du Lac St-Jean et sur la Côte-Nord.

Les courbes moyennes de largeur de cerne au dhp des arbres dominants des jeunes peuplements sont toujours supérieures à celles des vieux peuplements, mais elles se sont stabilisées en bas du niveau des vieux peuplements qui eux se sont stabilisés plus tard. Les courbes des jeunes peuplements augmentent beaucoup les 20 à 30 premières années et semblent se stabiliser et même un peu diminuer par la suite. La croissance en diamètre des vieux peuplements augmente plus graduellement que celle des jeunes pour atteindre un plateau, puis semble un peu diminuer par la suite.

3.2.2. Largeur moyenne de cerne au dhp en fonction de l'année calendaire

Les courbes de largeur moyenne de cerne au dhp en fonction des années calendaires pour chaque paire de peuplements sont présentées à la figure 3. Il est possible de déterminer à partir de cette figure les baisses et les hausses de croissance en diamètre qui ont affecté chacun des peuplements. Tous les peuplements ont subi un ralentissement de leur croissance en diamètre dans les

années 1970 et dans les débuts des années 1980. De plus, deux peuplements présentent des baisses marquées de croissance en diamètre dans les années 1910 (3,8).

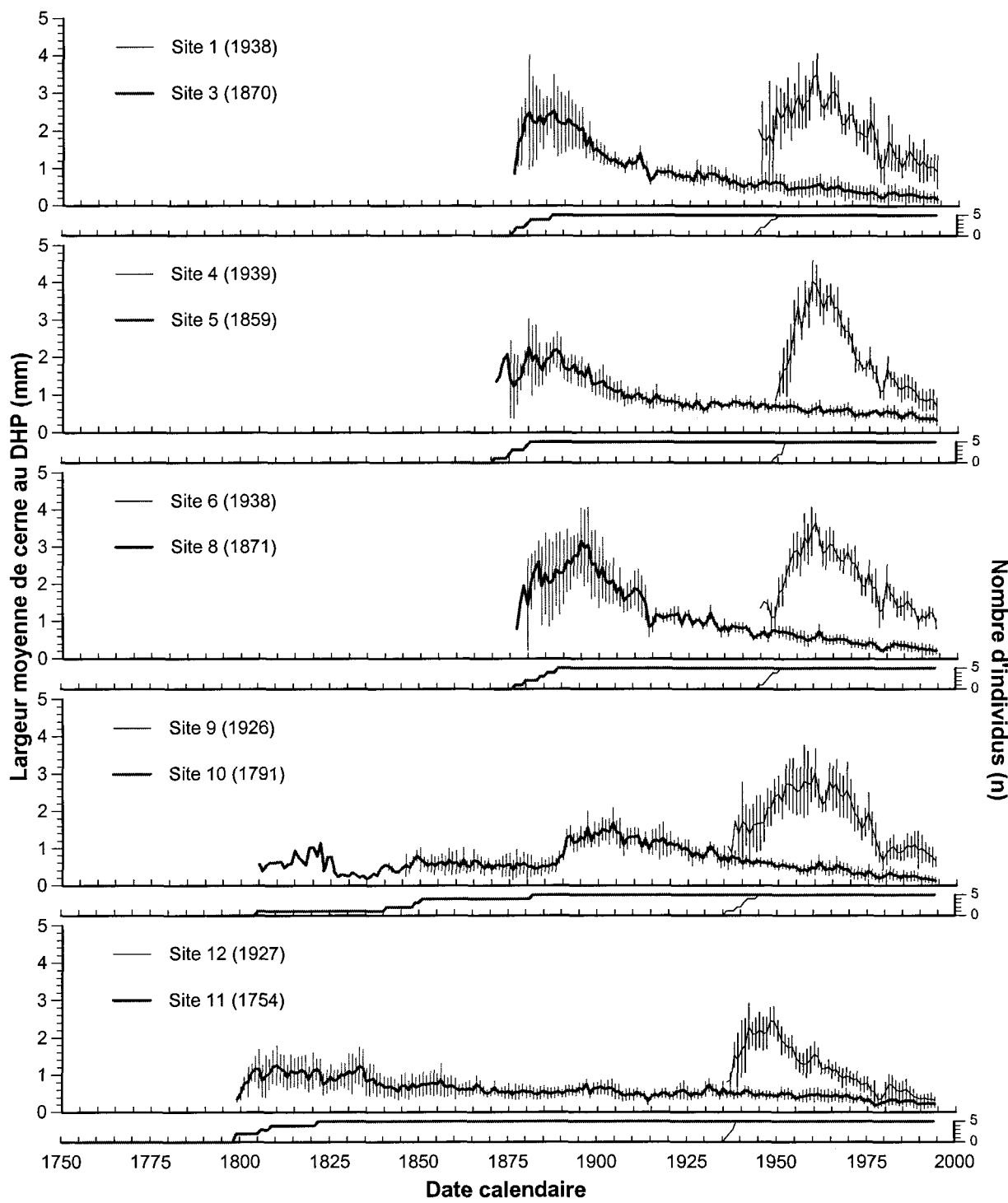


Figure 3. Largeur moyenne de cerne au dhp (mm), écarts-types et nombre d'individus en fonction de la date calendaire pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

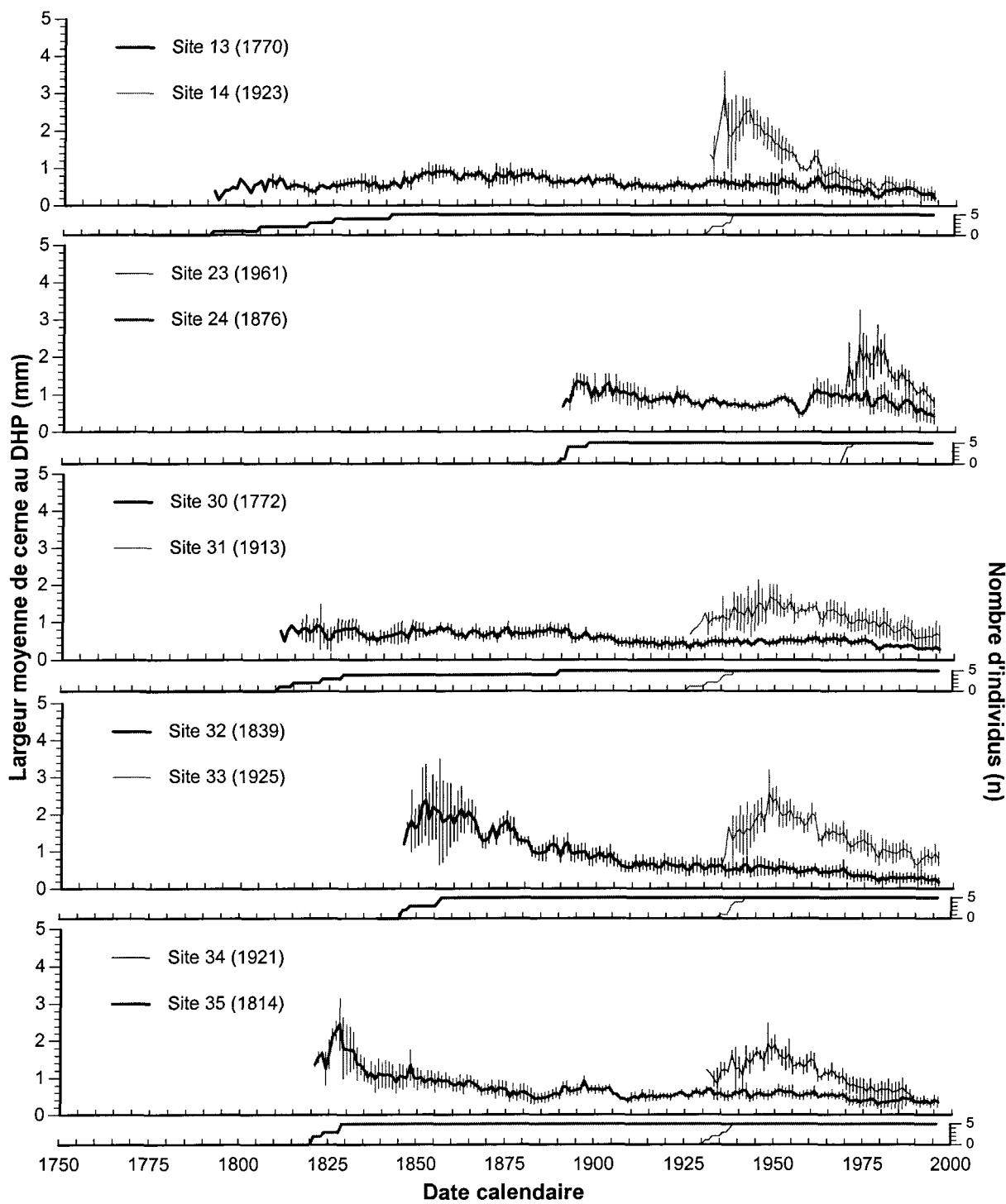


Figure 3 (suite). Largeur moyenne de cerne au dhp (mm), écarts-types et nombre d'individus en fonction de la date calendaire pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

3.3. *Rayon moyen au dhp*

Les courbes de rayon moyen au dhp ont été réalisées à partir des données d'analyse de tige. Ces courbes représentent la moyenne des rayons au dhp des arbres dominants d'un peuplement en fonction de l'âge cambial. Elles sont regroupées selon les paires de peuplements.

3.3.1. Comparaison des patrons de rayon moyen au dhp en fonction de l'âge cambial

La figure 4 présente les courbes de rayon moyen au dhp en fonction de l'âge cambial pour chaque paire de peuplements.

Les courbes de rayon moyen au dhp des jeunes peuplements et ceux plus âgés à l'intérieur d'une paire ont été classées selon trois patrons distincts, soit :

- A. Courbes relativement semblables pour les deux peuplements d'une paire donnée;
- B. Courbes des jeunes peuplements toujours supérieures à celles des vieux peuplements;
- C. Courbes des jeunes peuplements toujours supérieures à celles des vieux peuplements, mais elles ont des pentes inférieures (sauf au début) à celles des vieux peuplements.

En général, pour les patrons décrits précédemment, la pente des courbes a tendance à s'aplatir avec l'âge ou les années. Le rayon moyen au dhp augmente

rapidement en début de vie, puis il diminue et semble être relativement constant par la suite.

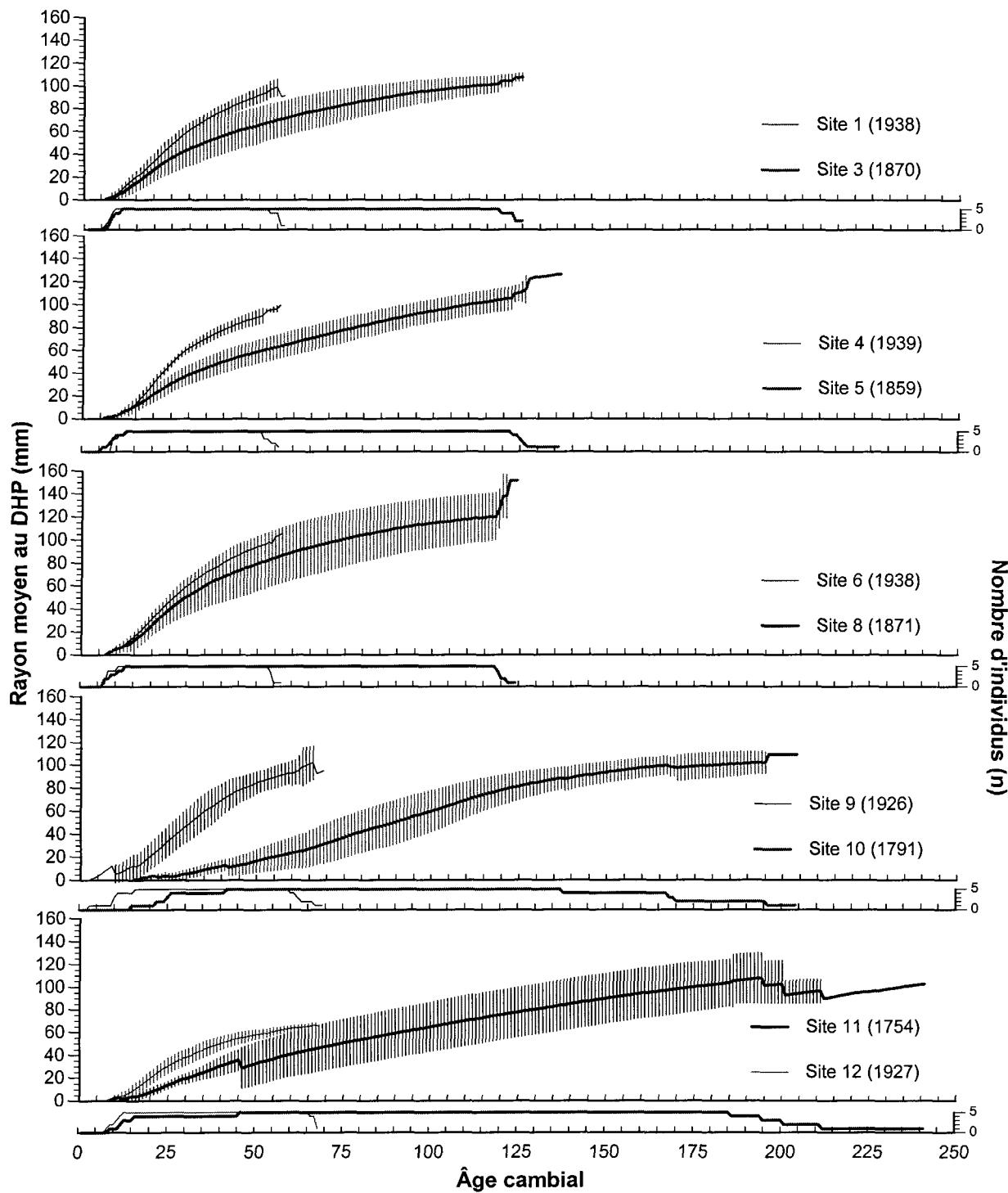


Figure 4. Rayon moyen au dhp (mm), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

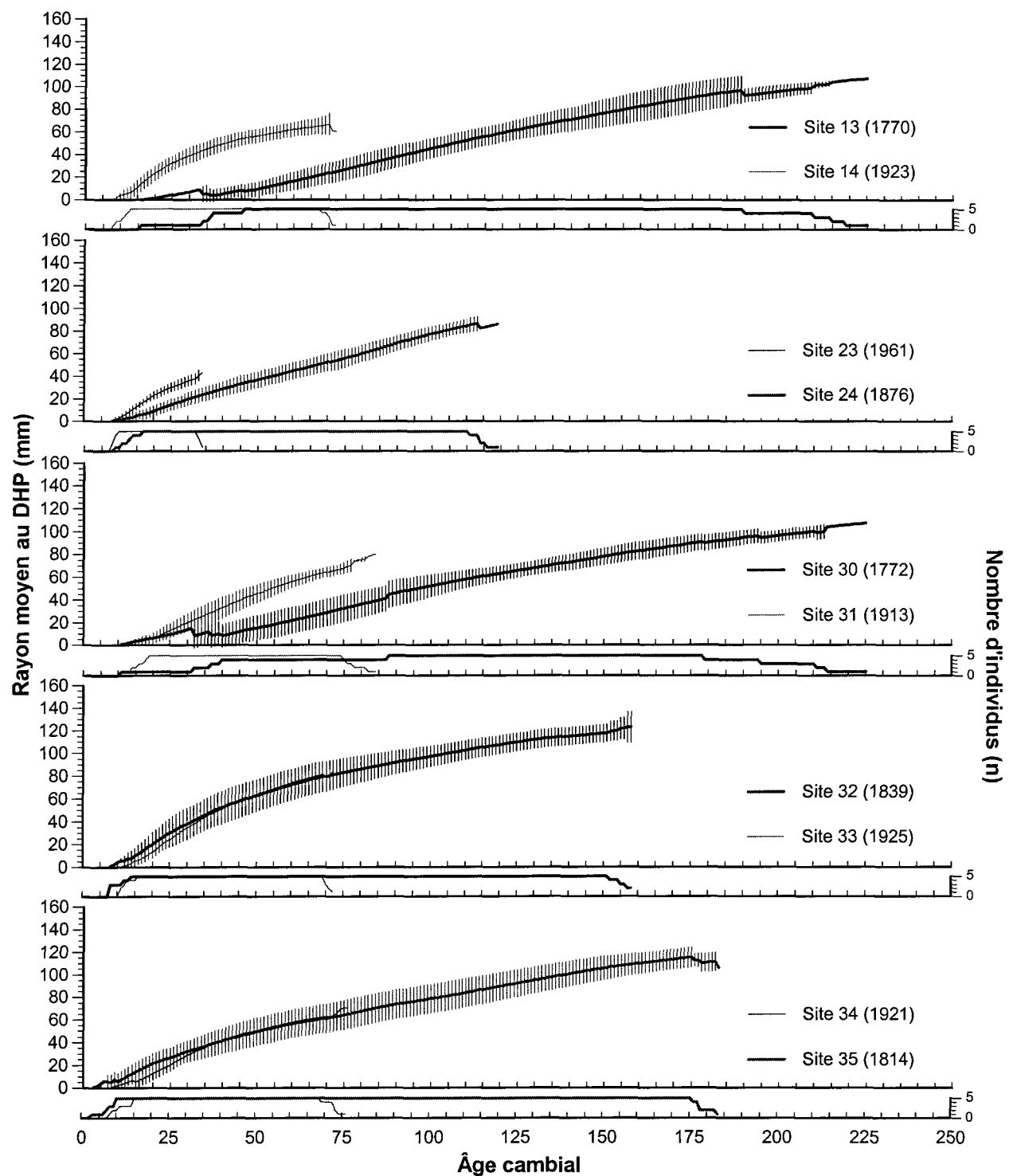


Figure 4 (suite). Rayon moyen au dhp (mm), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

A. Les courbes de rayon moyen au dhp sont semblables

Les courbes de rayon moyen au dhp des paires 32-33 et 34-35 sont relativement semblables pour les arbres dominants des jeunes et des vieux peuplements (figure 4). De plus, les courbes et les écarts-types des jeunes et des vieux peuplements se confondent parfaitement, indiquant une croissance relativement semblable. Les peuplements constituant ces paires sont situés au même endroit (dans la région de la Côte-Nord) et ont des dates d'installation relativement semblables (1839-1925 et 1814-1921).

B. Les courbes de rayon moyen au dhp des jeunes peuplements sont toujours supérieures

Les courbes de rayon moyen au dhp des arbres dominants des jeunes peuplements pour les paires 1-3, 4-5, 6-8, 9-10, 23-24 et 30-31 sont toujours supérieures à celles des vieux peuplements (figure 4). Les écarts-types des paires 1-3, 4-5, 9-10, 23-24 et 30-31 ne se recouvrent pas, ce qui indique une croissance différente. Par contre, on note une superposition des écarts-types pour la paire 6-8. Les peuplements constituant ces paires proviennent de lieux différents et ont des dates d'installation différentes.

C. Les courbes des jeunes peuplements sont toujours supérieures à celles des vieux peuplements, mais elles ont des pentes inférieures (sauf au début) à celles des vieux peuplements

Les courbes de rayon moyen au dhp des arbres dominants des jeunes peuplements pour les paires 11-12 et 13-14 sont toujours supérieures à celles des vieux peuplements (figure 4), mais elles tendent à rejoindre celles des vieux peuplements. Les écarts-types de chaque paire de ce groupe ne se recouvrent pas, ce qui indique une croissance différente. Les peuplements constituant ces paires proviennent de lieux rapprochés (au nord du Lac St-Jean) et ont des dates d'installation relativement semblables (1754-1927 et 1770-1923).

3.4. Accroissement en hauteur

Les courbes d'accroissement en hauteur ont été réalisées à partir des données d'analyse de tige. Ces courbes représentent la moyenne des accroissements en hauteur des arbres dominants d'un peuplement en fonction de l'âge cambial et de l'année calendaire. Elles sont regroupées selon les paires de peuplements.

3.4.1. Comparaison des patrons d'accroissement en hauteur en fonction de l'âge cambial

La figure 5 présente les courbes d'accroissement en hauteur des arbres dominants en fonction de l'âge cambial pour chaque paire de peuplements.

Les courbes d'accroissement en hauteur des jeunes peuplements et ceux plus âgés à l'intérieur d'une paire ont été classées selon trois patrons distincts, soit :

- A. Courbes relativement semblables pour les deux peuplements d'une paire donnée;
- B. Courbes des jeunes peuplements toujours supérieures à celle des vieux peuplements;
- C. Courbes des jeunes peuplements supérieures à celles des vieux peuplements, mais elles rejoignent celles des vieux peuplements.

A. Les courbes moyennes d'accroissement en hauteur sont semblables

Les courbes moyennes d'accroissement en hauteur des paires 32-33 et 34-35 sont relativement semblables pour les arbres dominants des jeunes et des vieux peuplements (figure 5). De plus, les courbes et les écarts-types des jeunes et des vieux peuplements se confondent parfaitement, indiquant une croissance relativement semblable. Les peuplements constituant ces paires sont situés au même endroit (dans la région de la Côte-Nord) et ont des dates d'installation relativement semblables (1839-1925 et 1814-1921).

L'accroissement en hauteur des arbres dominants des jeunes et des vieux peuplements augmente durant les 25 premières années, puis diminue lentement par la suite. La croissance en hauteur augmente beaucoup au début, puis se stabilise et tend à diminuer avec l'âge.

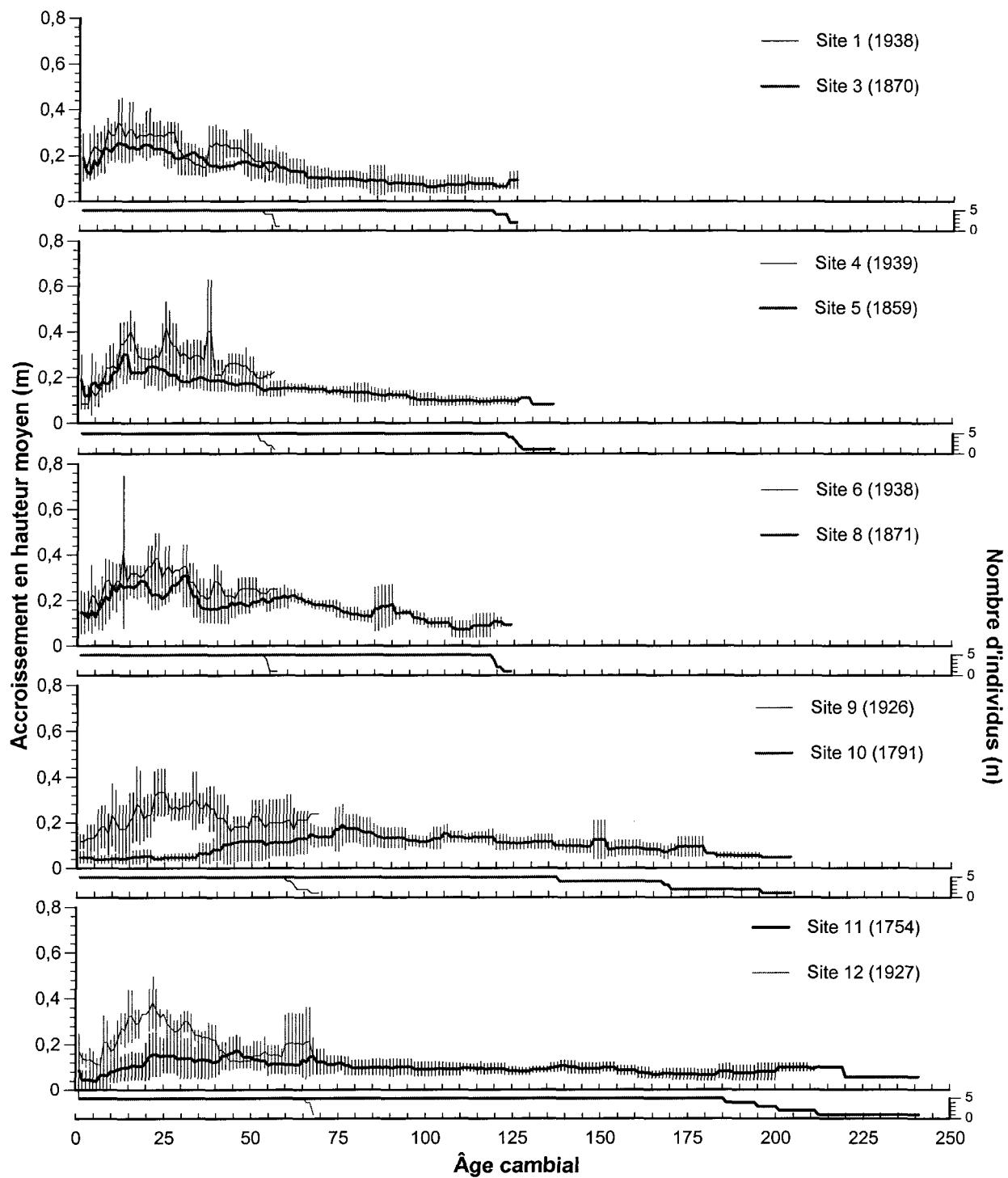


Figure 5. Accroissement en hauteur moyen (m), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

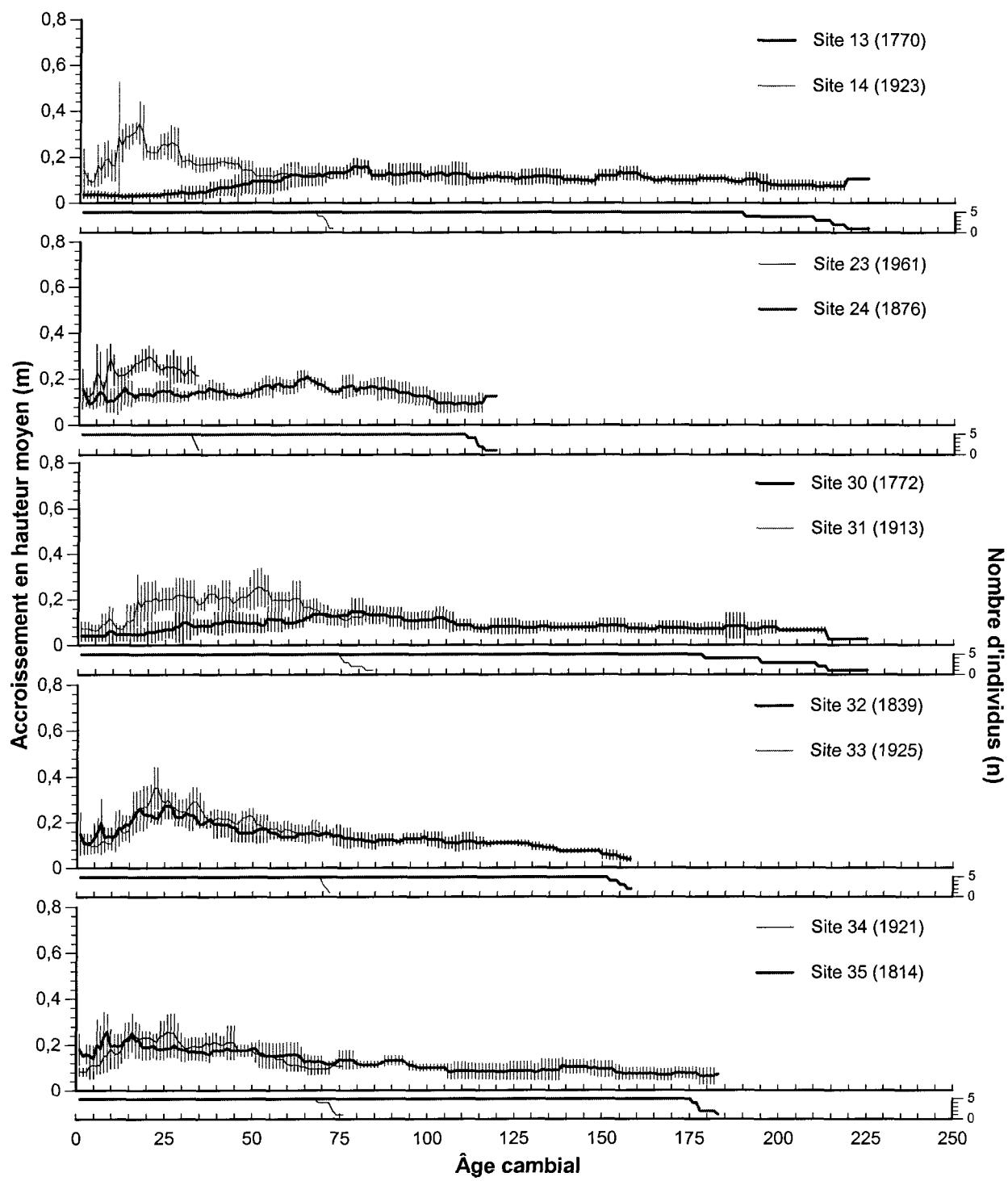


Figure 5 (suite). Accroissement en hauteur moyen (m), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

B. Les courbes moyennes d'accroissement en hauteur des jeunes peuplements sont toujours supérieures

Les courbes moyennes d'accroissement en hauteur des arbres dominants des jeunes peuplements pour les paires 4-5, 6-8, 9-10 et 23-24 sont toujours supérieures à celles des vieux peuplements (figure 5). Les écarts-types des paires 9-10 et 23-24 ne se recouvrent pas, ce qui indique une croissance différente. Ce qui n'est pas le cas pour les paires 4-5 et 6-8. Les peuplements constituant ces paires proviennent de lieux rapprochés mais ont des dates d'installation différentes.

Les courbes d'accroissement en hauteur des arbres dominants des jeunes peuplements augmentent beaucoup durant les 25 premières années et semblent se stabiliser et même un peu diminuer par la suite. Les courbes d'accroissement en hauteur des arbres dominants des vieux peuplements des paires 9-10 et 23-24 augmentent plus graduellement que celles des jeunes peuplements. Elles atteignent un plateau après 80 à 100 ans et diminuent lentement par la suite. Par contre, les courbes des arbres dominants des vieux peuplements des paires 4-5 et 6-8 évoluent à la manière des jeunes peuplements.

C. Les courbes moyennes d'accroissement en hauteur des jeunes peuplements sont supérieures, mais elles rejoignent celles des vieux peuplements

Les courbes moyennes d'accroissement en hauteur des arbres dominants des jeunes peuplements pour les paires 1-3, 11-12, 13-14 et 30-31 sont supérieures à celles des vieux peuplements (figure 5), mais elles rejoignent celles des vieux peuplements. Les écarts-types des paires 13-14 et 30-31 ne se recouvrent pas indiquant une croissance différente. Pour la paire 1-3, les écarts-types se

confondent presque tout le temps. Pour la paire 11-12, les écarts-types s'entrecroisent entre 50 et 70 ans.

Les peuplements constituant ces paires sont situés au même endroit (dans la région du nord du Lac St-Jean), sauf pour la paire 30-31 (Côte-Nord), mais ont des dates d'installation différentes.

Les courbes moyennes d'accroissement en hauteur des arbres dominants des jeunes peuplements sont toujours supérieures à celles des vieux peuplements, mais elles se sont stabilisées en bas du niveau des vieux peuplements qui eux se sont stabilisés plus tard. Les courbes des jeunes peuplements augmentent beaucoup les 20 à 30 premières années et diminuent par la suite. La croissance des vieux peuplements augmente plus graduellement que celle des jeunes pour atteindre un plateau après 75 ans, puis diminue un peu par la suite.

3.4.2. Accroissement en hauteur en fonction de l'année calendaire

Les courbes d'accroissement en hauteur en fonction des années calendaires pour chaque paire de peuplements sont présentées à la figure 6. Il est possible de déterminer à partir de cette figure les baisses et les hausses de croissance qui ont affecté chacun des peuplements. Plusieurs courbes moyennes d'arbres dominants des jeunes peuplements ont subi un important ralentissement de leur croissance en hauteur dans les années 1970 et dans les débuts des années 1980. Ce constat est moins évident pour les arbres dominants des vieux peuplements.

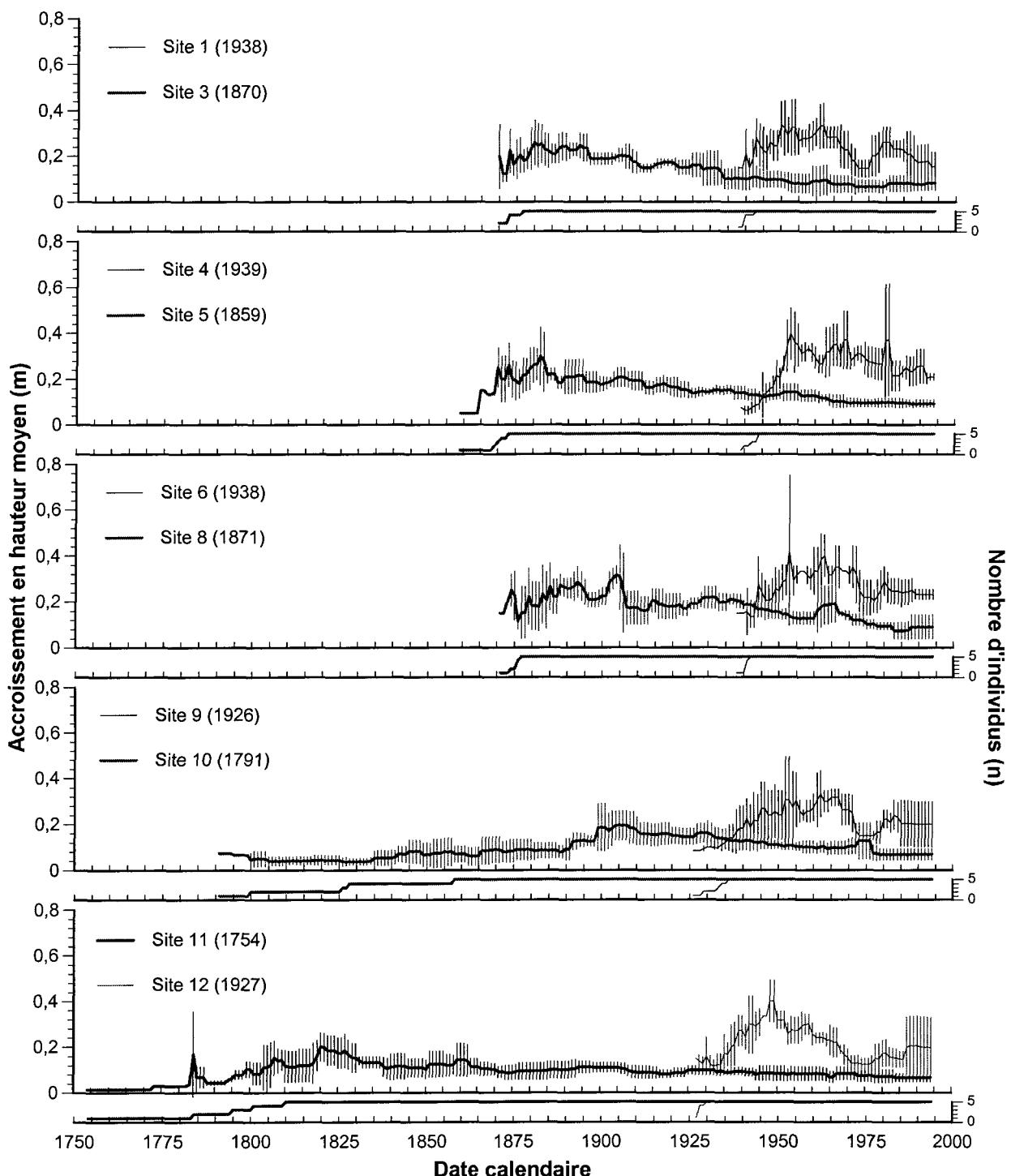


Figure 6. Accroissement en hauteur moyen (m), écarts-types et nombre d'individus en fonction de la date calendaire pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

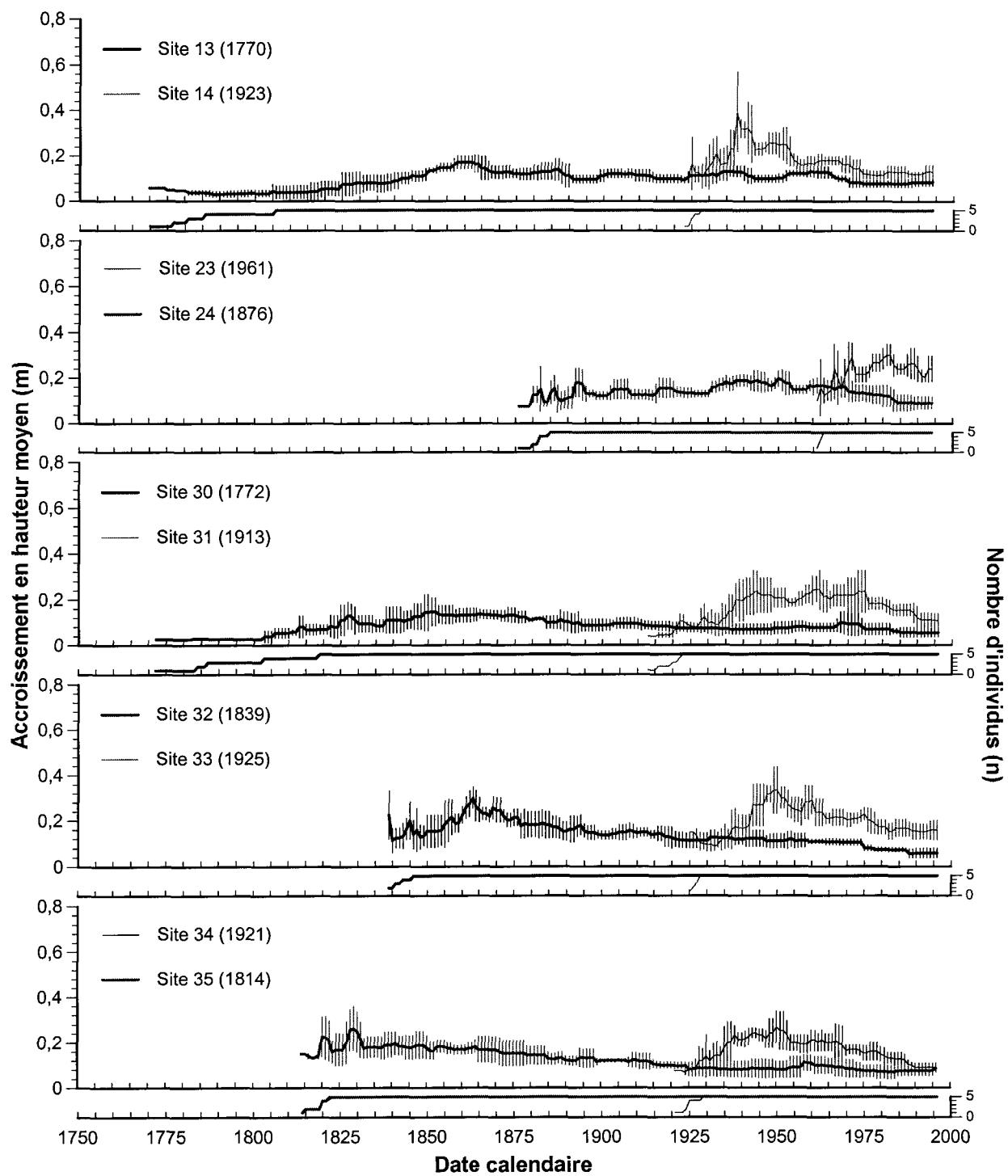


Figure 6 (suite). Accroissement en hauteur moyen (m), écarts-types et nombre d'individus en fonction de la date calendaire pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

3.5. Hauteur moyenne

Les courbes de hauteur moyenne ont été réalisées à partir des données d'analyse de tige. Ces courbes représentent la moyenne des hauteurs des arbres dominants d'un peuplement en fonction de l'âge cambial. Elles sont regroupées selon les paires de peuplements.

3.5.1. Comparaison des patrons d'accroissement en hauteur en fonction de l'âge cambial

La figure 7 présente les courbes de hauteur moyenne en fonction de l'âge cambial pour chaque paire de peuplements.

Les courbes de hauteur moyenne des jeunes peuplements et ceux plus âgés à l'intérieur d'une paire ont été classées selon trois patrons distincts, soit :

- A. Courbes relativement semblables pour les deux peuplements d'une paire donnée;
- B. Courbes des jeunes peuplements toujours supérieures à celles des vieux peuplements;
- C. Courbes des jeunes peuplements toujours supérieures à celles des vieux peuplements, mais elles ont des pentes inférieures (sauf au début) à celles des vieux peuplements.

En général, pour les patrons décrits précédemment, la pente des courbes est relativement constante et a tendance à s'aplatir avec l'âge ou les années. La

hauteur augmente à un rythme moyen en début de vie, puis elle tend à diminuer par la suite.

A. Les courbes de hauteur moyenne sont semblables

Les courbes de hauteur moyenne des paires 32-33 et 34-35 sont relativement semblables pour les arbres dominants des jeunes et des vieux peuplements (figure 7). De plus, les courbes et les écarts-types des jeunes et des vieux peuplements se confondent parfaitement, indiquant une croissance relativement semblable. Les peuplements constituant ces paires sont situés au même endroit (dans la région de la Côte-Nord) et ont des dates d'installation relativement semblables (1839-1925 et 1814-1921).

B. Les courbes de hauteur moyenne des jeunes peuplements sont toujours supérieures

Les courbes de hauteur moyenne des arbres dominants des jeunes peuplements pour les paires 1-3, 4-5, 6-8, 9-10, 11-12, 23-24 et 30-31 sont toujours supérieures à celles des vieux peuplements (figure 7). Les écarts-types des paires 4-5, 6-8, 9-10, 11-12, 23-24 et 30-31 ne se recouvrent pas, ce qui indique une croissance différente. Par contre, on note une superposition des écarts-types pour la paire 1-3. Les peuplements constituant ces paires proviennent de lieux différents et ont des dates d'installation différentes.

C. Les courbes des jeunes peuplements sont toujours supérieures à celles des vieux peuplements, mais elles ont des pentes inférieures (sauf au début) à celles des vieux peuplements

La courbe de hauteur moyenne des arbres dominants du jeune peuplement de la paire 13-14 est toujours supérieure à celle du vieux peuplement (figure 7), mais elle tend à rejoindre celle du vieux peuplement. Les écarts-types de cette paire ne se recouvrent pas, ce qui indique une croissance différente.

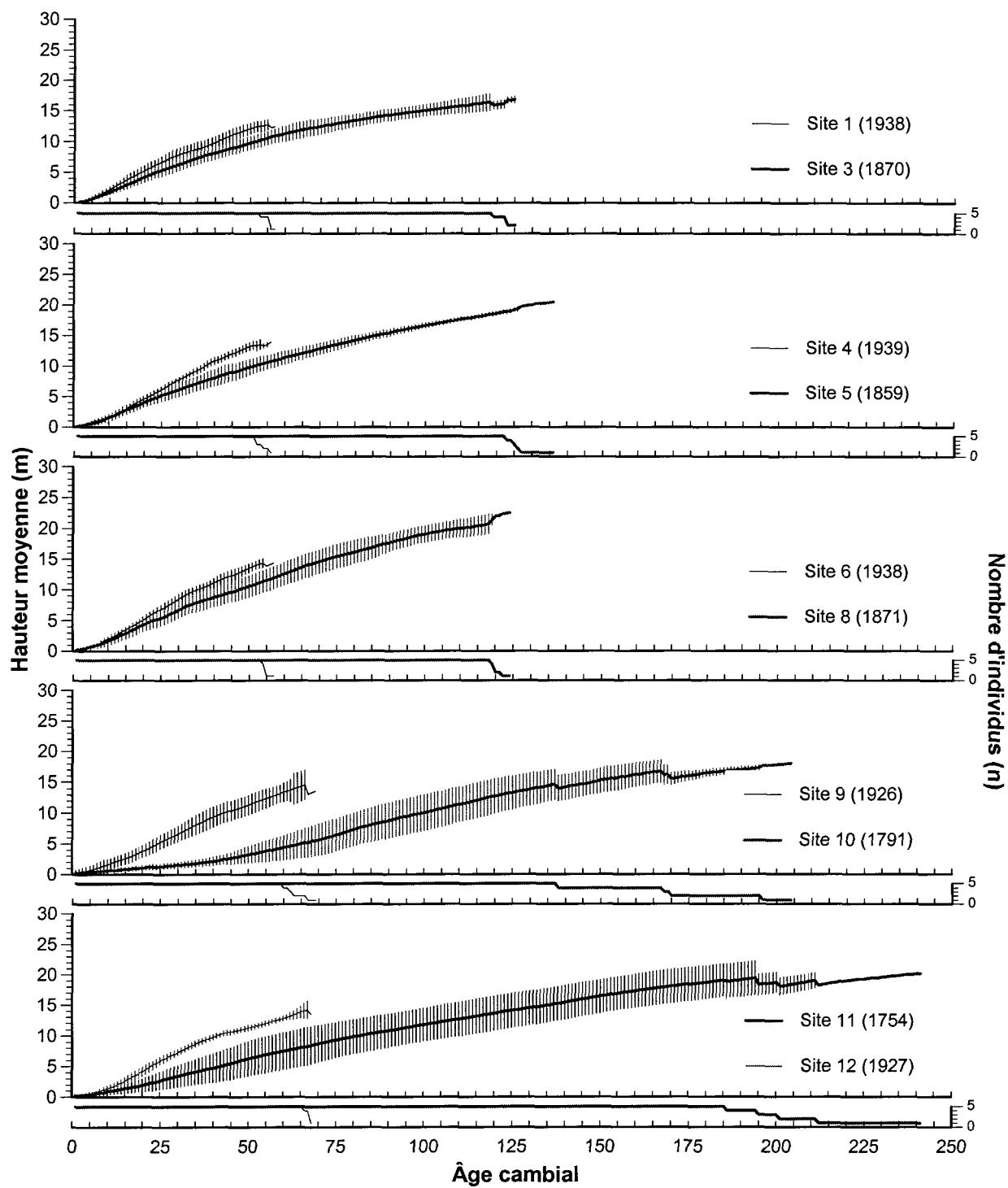


Figure 7. Hauteur moyenne (m), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

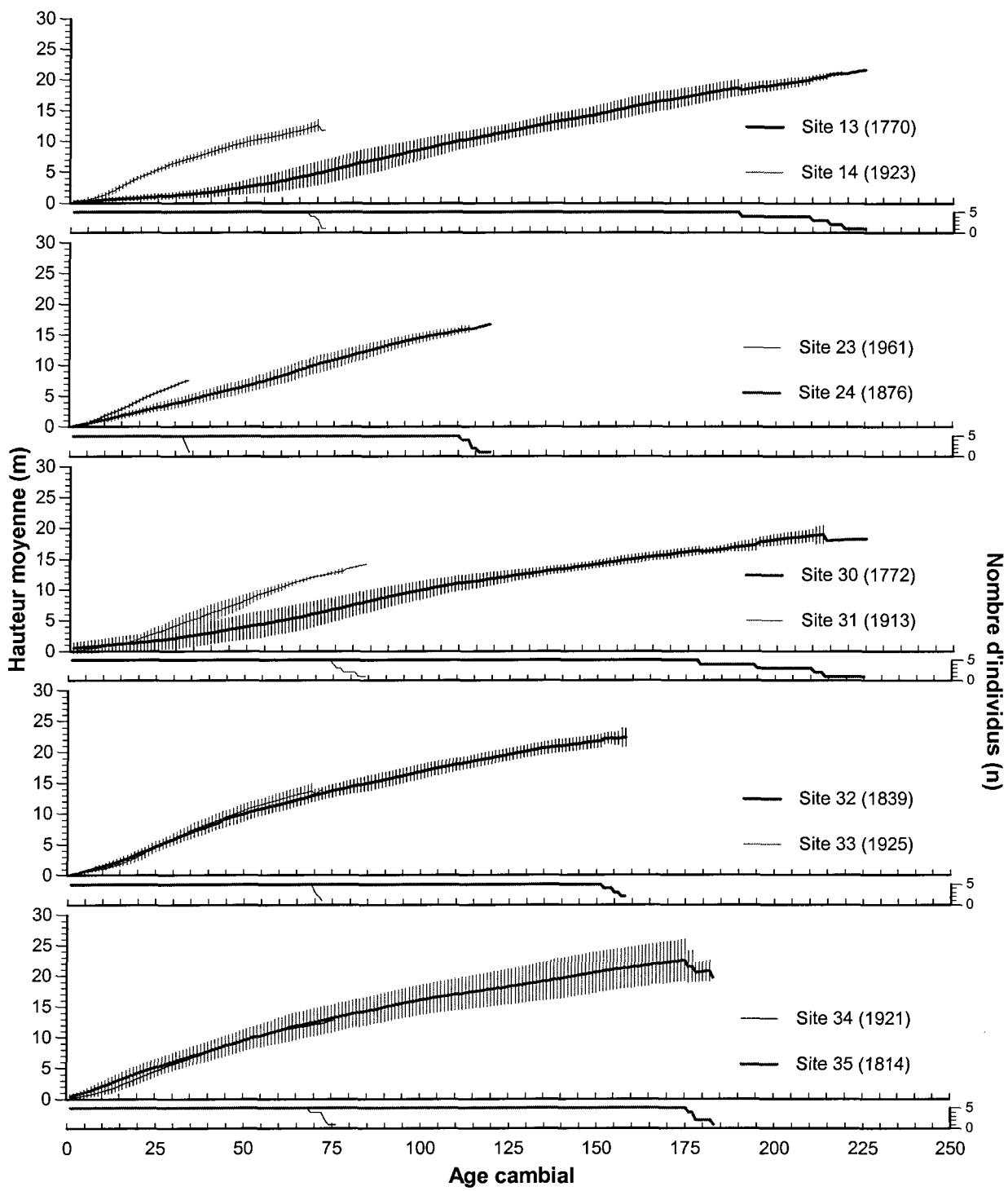


Figure 7 (suite). Hauteur moyenne (m), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

3.6. Accroissement en volume

Les courbes d'accroissement en volume ont été réalisées à partir des données d'analyse de tige. Ces courbes représentent la moyenne des accroissements en volume des arbres dominants d'un peuplement en fonction de l'âge cambial et de l'année calendaire. Elles sont regroupées selon les paires de peuplements.

3.6.1. Comparaison des patrons d'accroissement en volume en fonction de l'âge cambial

La figure 8 présente les courbes d'accroissement en volume des arbres dominants en fonction de l'âge cambial pour chaque paire de peuplements.

Les courbes d'accroissement en volume des jeunes peuplements et ceux plus âgés à l'intérieur d'une paire ont été classées selon trois patrons distincts, soit :

- A. Courbes relativement semblables pour les deux peuplements d'une paire donnée;
- B. Courbes des jeunes peuplements toujours supérieures à celle des vieux peuplements;
- C. Courbes des jeunes peuplements supérieures à celles des vieux peuplements, mais elles rejoignent celles des vieux peuplements.

A. Les courbes moyennes d'accroissement en volume sont semblables

Les courbes moyennes d'accroissement en volume des paires 32-33 et 34-35 sont relativement semblables pour les arbres dominants des jeunes et des vieux peuplements (figure 8). De plus, les courbes et les écarts-types des jeunes et des vieux peuplements se confondent parfaitement, indiquant une croissance relativement semblable. Les peuplements constituant ces paires sont situés au même endroit (dans la région de la Côte-Nord) et ont des dates d'installation relativement semblables (1839-1925 et 1814-1921).

L'accroissement en volume des arbres dominants des jeunes et des vieux peuplements augmente beaucoup durant les 50 premières années, puis semble se stabiliser par la suite, sauf pour le site 35. Pour ce dernier, la croissance augmente jusqu'à 140 ans, puis se stabilise par la suite. La croissance en volume augmente beaucoup au début, puis se stabilise et tend à diminuer avec l'âge.

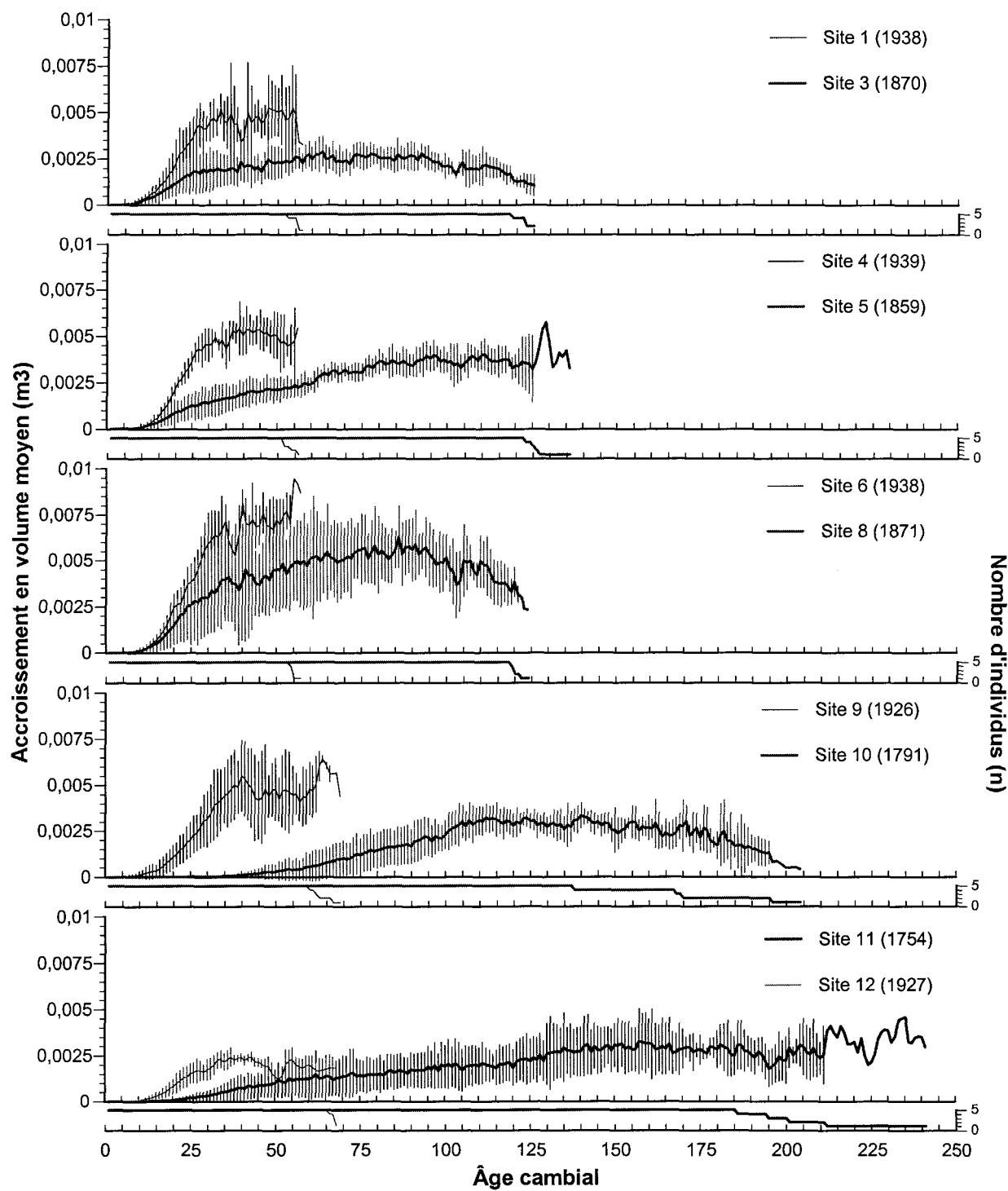


Figure 8. Accroissement en volume moyen (m³), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

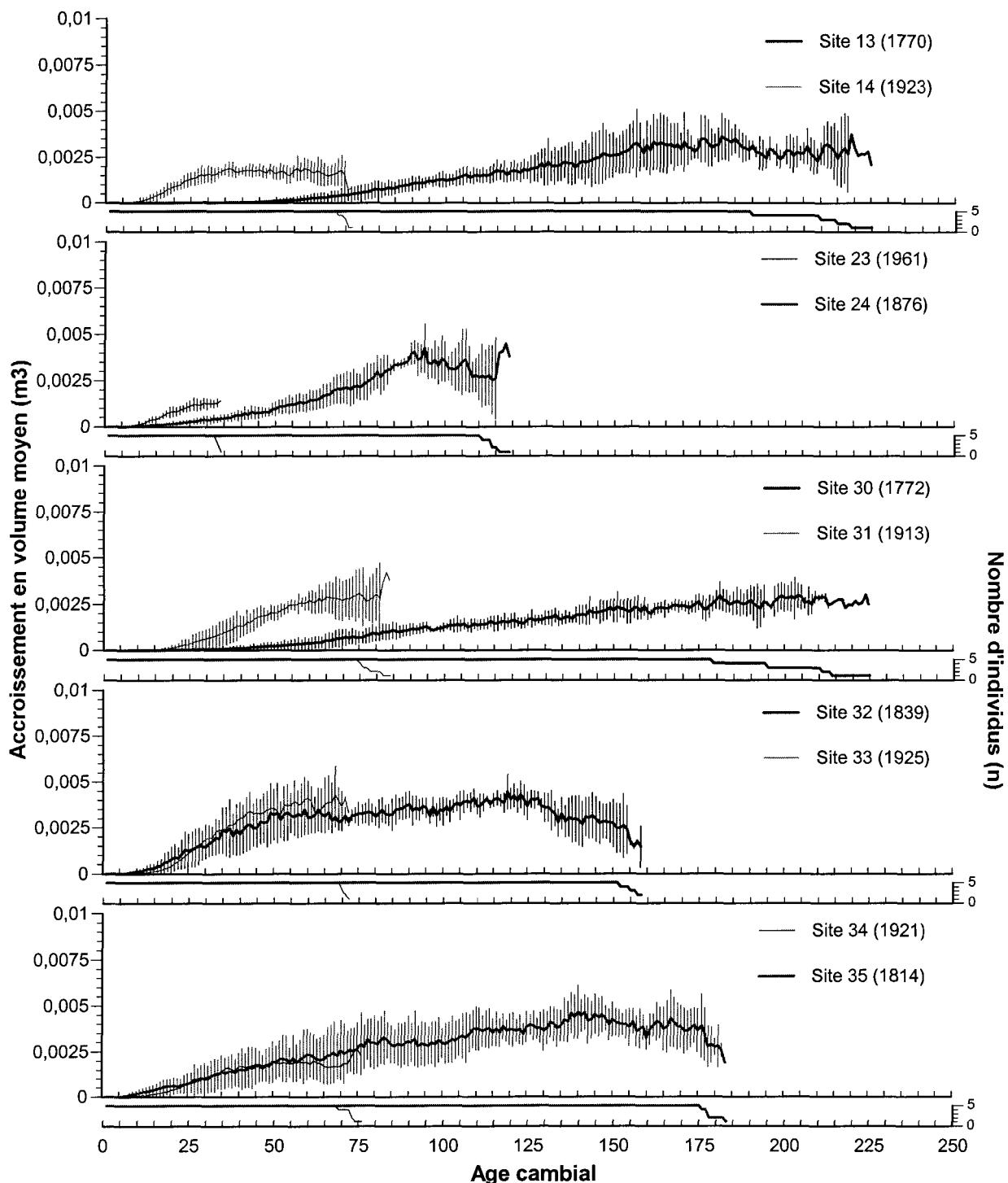


Figure 8 (suite). Accroissement en volume moyen (m^3), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

B. Les courbes moyennes d'accroissement en volume des jeunes peuplements sont toujours supérieures

Les courbes moyennes d'accroissement en volume des arbres dominants des jeunes peuplements pour les paires 1-3, 4-5, 6-8, 9-10, 23-24 et 30-31 sont toujours supérieures à celles des vieux peuplements (figure 8). Les écarts-types de chaque paire de ce groupe ne se recouvrent pas, à l'exception de la paire 6-8, ce qui indique une croissance différente. Les peuplements constituant ces paires proviennent de lieux différents et ont des dates d'installation différentes.

Les courbes d'accroissement en volume des arbres dominants des jeunes peuplements augmentent beaucoup durant les 20 à 30 premières années et semblent se stabiliser et même un peu diminuer par la suite. Les courbes d'accroissement en volume des arbres dominants des vieux peuplements augmentent plus graduellement que celles des jeunes peuplements et atteignent un plateau après 80 à 100 ans. Elles semblent diminuer graduellement par la suite, à l'exception du peuplement 8 qui a une courbe d'accroissement en volume qui ressemble à celles des jeunes peuplements du présent groupe.

C. Les courbes moyennes d'accroissement en volume des jeunes peuplements sont supérieures, mais elles rejoignent celles des vieux peuplements

Les courbes moyennes d'accroissement en volume des arbres dominants des jeunes peuplements pour les paires 11-12 et 13-14 sont supérieures à celles des vieux peuplements (figure 8), mais elles rejoignent celles des vieux peuplements. Les écarts-types de chaque paire de ce groupe ne se recouvrent pas indiquant une croissance différente, sauf pour la paire 11-12 où les écarts-types s'entrecroisent entre 50 et 70 ans.

Les peuplements constituant ces paires sont situés au même endroit (dans la région du nord du Lac St-Jean) et ont des dates d'installation relativement semblables (1754-1927 et 1770-1923).

Les courbes moyennes d'accroissement en volume des arbres dominants des jeunes peuplements sont toujours supérieures à celles des vieux peuplements, mais elles se sont stabilisées en bas du niveau des vieux peuplements qui eux se sont stabilisés plus tard. Les courbes des jeunes peuplements augmentent beaucoup les 20 à 30 premières années et semblent se stabiliser et même un peu diminuer par la suite. La croissance des vieux peuplements augmente plus graduellement que celle des jeunes pour atteindre un plateau après 150 à 160 ans, puis semble un peu diminuer par la suite.

3.6.2. Accroissement en volume en fonction de l'année calendaire

Les courbes d'accroissement en volume en fonction des années calendaires pour chaque paire de peuplements sont présentées à la figure 9. Il est possible de déterminer à partir de cette figure les baisses et les hausses de croissance qui ont affecté chacun des peuplements. Tous les peuplements ont subi un important ralentissement de leur croissance en volume dans les années 1970 et dans les débuts des années 1980. De plus, plusieurs peuplements présentent des baisses marquées de croissance en volume dans les années 1910 (3, 8, 11, 32, 35).

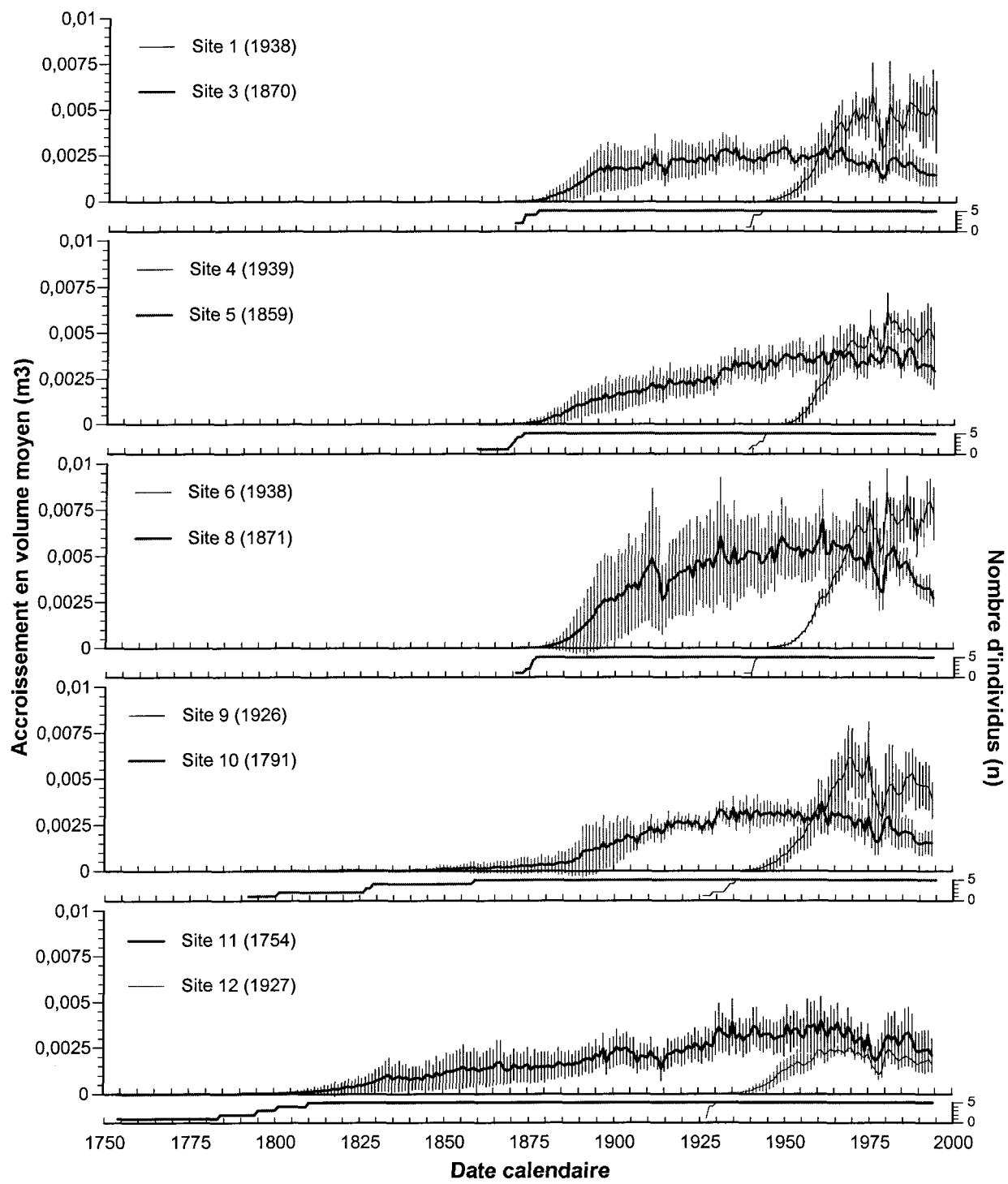


Figure 9. Accroissement en volume moyen (m^3), écarts-types et nombre d'individus en fonction de la date calendaire pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

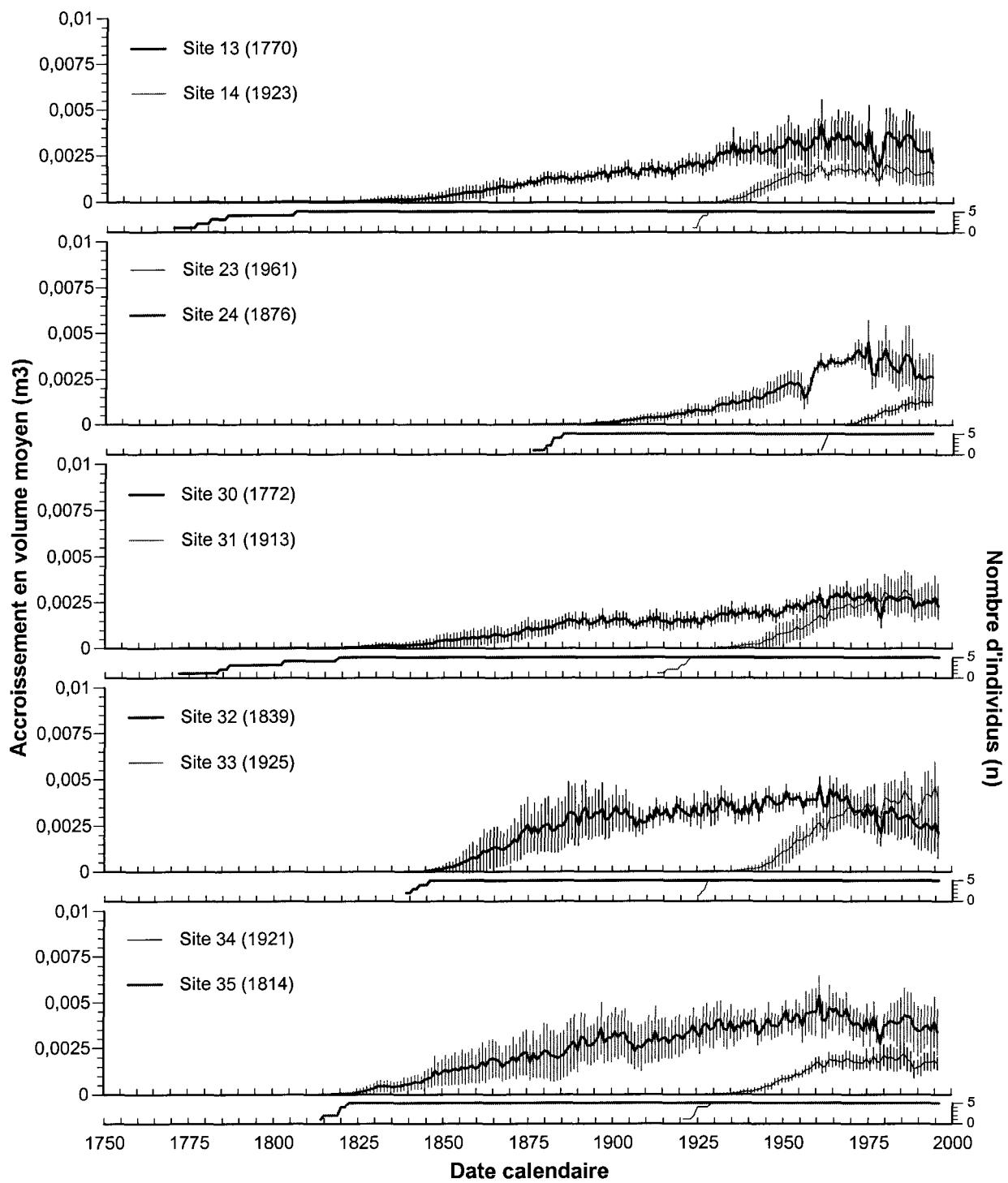


Figure 9 (suite). Accroissement en volume moyen (m³), écarts-types et nombre d'individus en fonction de la date calendaire pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

3.7. *Volume moyen*

Les courbes de volume moyen ont été réalisées à partir des données d'analyse de tige. Ces courbes représentent la moyenne des volumes des arbres dominants d'un peuplement en fonction de l'âge cambial. Elles sont regroupées selon les paires de peuplements.

3.7.1. Comparaison des patrons d'accroissement en volume en fonction de l'âge cambial

La figure 10 présente les courbes de volume moyen en fonction de l'âge cambial pour chaque paire de peuplements.

Les courbes de volume moyen des jeunes peuplements et ceux plus âgés à l'intérieur d'une paire ont été classées selon trois patrons distincts, soit :

- A. Courbes relativement semblables pour les deux peuplements d'une paire donnée;
- B. Courbes des jeunes peuplements toujours supérieures à celles des vieux peuplements;
- C. Courbes des jeunes peuplements toujours supérieures à celles des vieux peuplements, mais elles ont des pentes inférieures (sauf au début) à celles des vieux peuplements.

En général, pour les patrons décrits précédemment, la pente des courbes est relativement constante et n'a pas tendance à s'aplatir avec l'âge ou les années.

Le volume moyen augmente très lentement en début de vie, puis il passe par une phase d'augmentation plus rapide et relativement constante.

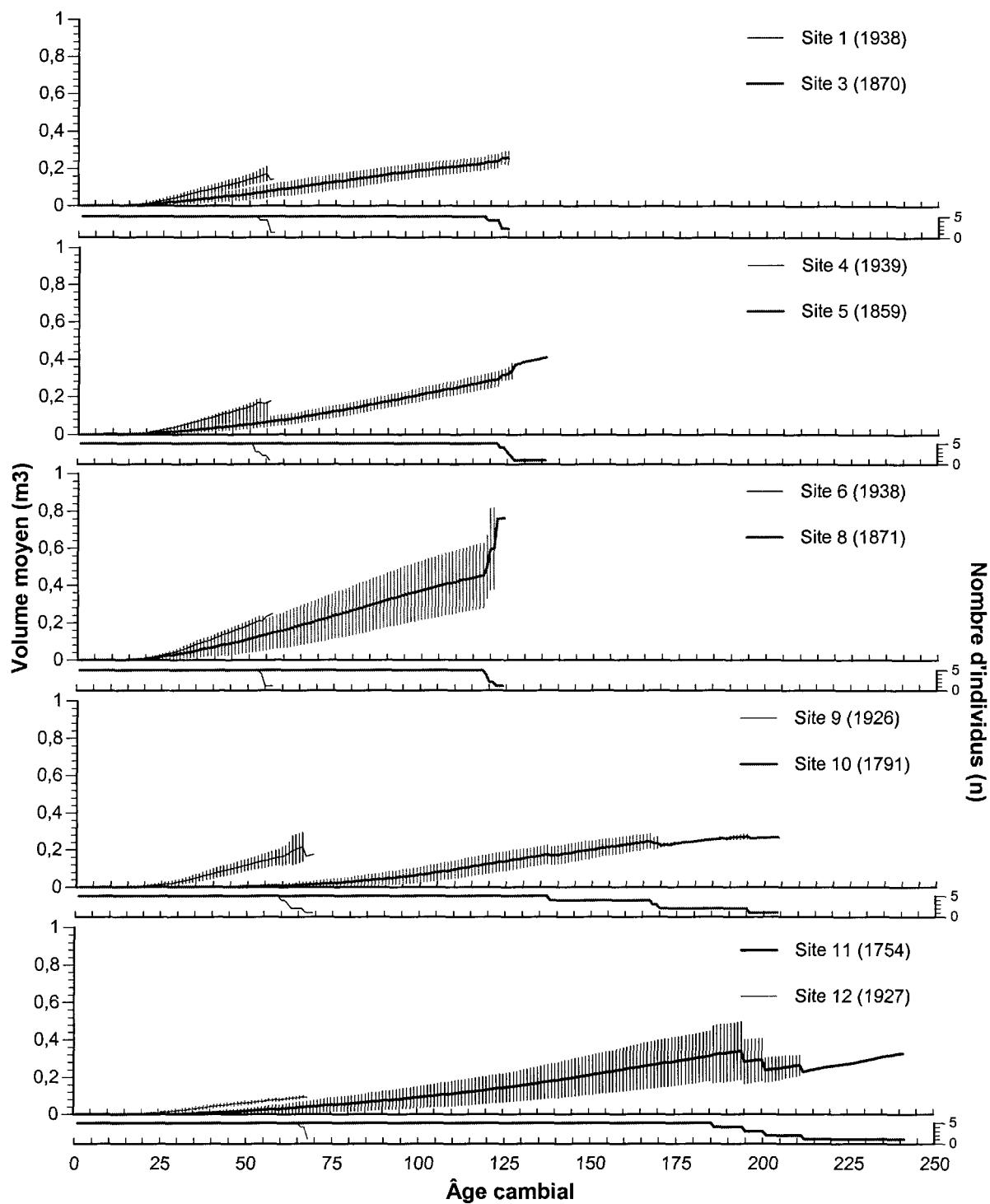


Figure 10. Volume moyen par arbre (m^3), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

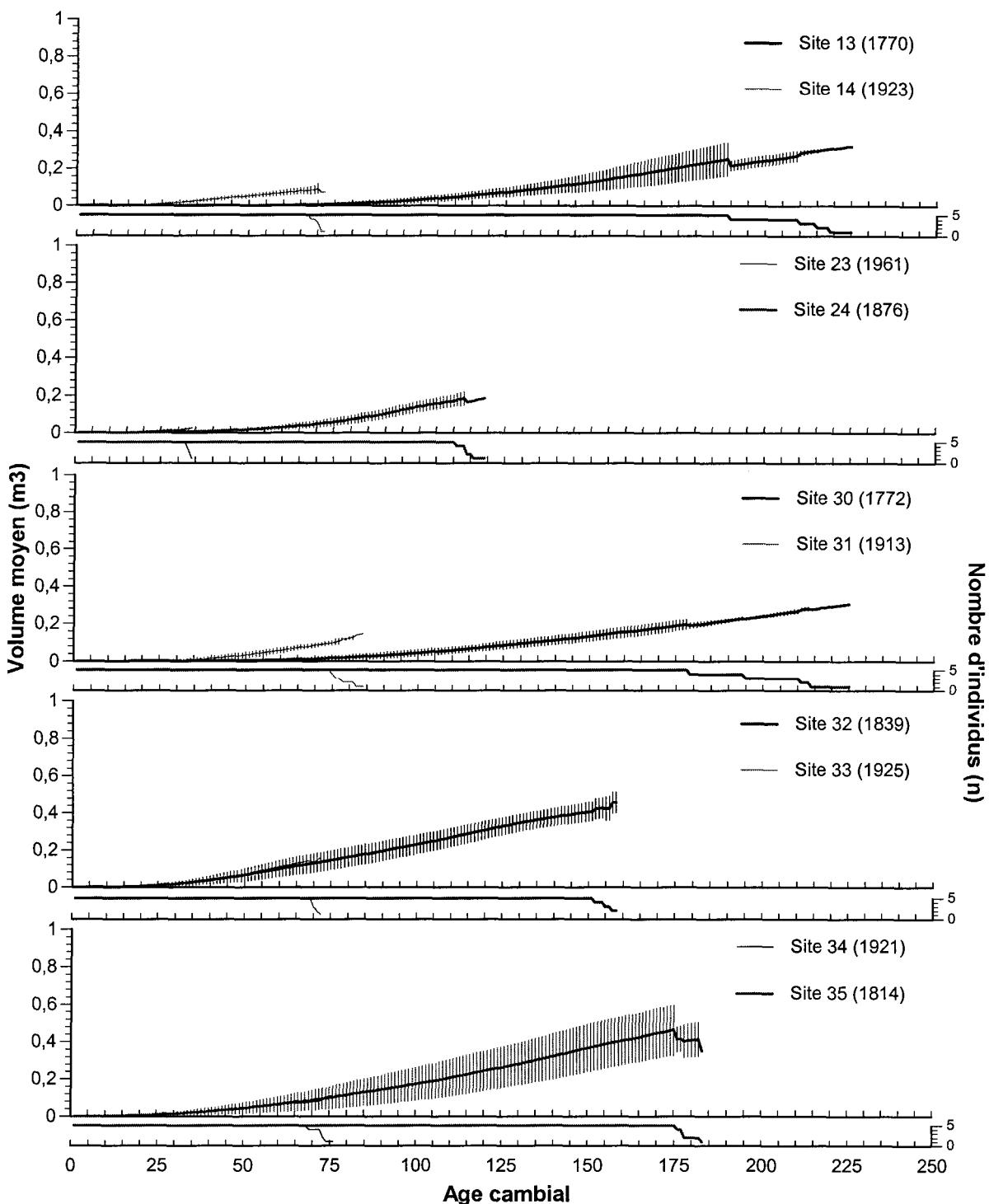


Figure 10 (suite). Volume moyen par arbre (m^3), écarts-types et nombre d'individus en fonction de l'âge cambial pour les différentes paires. La date la plus ancienne pour chacun des peuplements est indiquée entre parenthèses.

A. Les courbes de volume moyen sont semblables

Les courbes de volume moyen des paires 32-33 et 34-35 sont relativement semblables pour les arbres dominants des jeunes et des vieux peuplements (figure 10). De plus, les courbes et les écarts-types des jeunes et des vieux peuplements se confondent parfaitement, indiquant une croissance relativement semblable. Les peuplements constituant ces paires sont situés au même endroit (dans la région de la Côte-Nord) et ont des dates d'installation relativement semblables (1839-1925 et 1814-1921).

B. Les courbes de volume moyen des jeunes peuplements sont toujours supérieures

Les courbes de volume moyen des arbres dominants des jeunes peuplements pour les paires 1-3, 4-5, 6-8, 9-10 et 30-31 sont toujours supérieures à celles des vieux peuplements (figure 10). Les écarts-types des paires 1-3, 9-10 et 30-31 ne se recouvrent pas, ce qui indique une croissance différente. Par contre, on note une superposition des écarts-types pour les paires 4-5 et 6-8. Les peuplements constituant ces paires proviennent de lieux différents et ont des dates d'installation différentes.

C. Les courbes des jeunes peuplements sont toujours supérieures à celles des vieux peuplements, mais elles ont des pentes inférieures (sauf au début) à celles des vieux peuplements

Les courbes de volume moyen des arbres dominants des jeunes peuplements pour les paires 11-12, 13-14 et 23-24 sont toujours supérieures à celles des vieux peuplements (figure 10), mais elles tendent à rejoindre celles des vieux peuplements. Les écarts-types de chaque paire de ce groupe ne se recouvrent pas, ce qui indique une croissance différente. Les peuplements constituant ces paires proviennent de lieux différents et ont des dates d'installation différentes.

3.8. *Synthèse des paramètres analysés*

Le tableau 7 présente la synthèse des paramètres analysés en fonction des paires de peuplements et des patrons de croissance. Règle générale, les paires de peuplements se classent dans les mêmes patrons, indifféremment du paramètre de croissance, à l'exception de la largeur de cerne. Toutefois, pour ce dernier, les jeunes peuplements ont des croissances supérieures pour la majorité de leur existence.

Tableau 7. Synthèse des paramètres analysés en fonction des paires de peuplements et des patrons de croissance.

Paramètres de croissance	Patrons de croissance en fonction de l'âge cambial		
	Semblables	Jeunes peuplements toujours supérieurs	Jeunes peuplements supérieurs mais rejoignent les vieux
Largeur de cerne au dhp	6-8, 32-33, 34-35	Aucun	1-3, 4-5, 9-10, 11-12, 13-14, 23-24, 30-31
Rayon moyen au dhp	32-33, 34-35	1-3, 4-5, 6-8, 9-10, 23-24, 30-31	11-12, 13-14
Accroissement en hauteur moyen	32-33, 34-35	4-5, 6-8, 9-10, 23-24	1-3, 11-12, 13-14, 30-31
Hauteur moyenne	32-33, 34-35	1-3, 4-5, 6-8, 9-10, 11-12, 23-24, 30-31	13-14
Accroissement en volume moyen	32-33, 34-35	1-3, 4-5, 6-8, 9-10, 23-24, 30-31	11-12, 13-14
Volume moyen	32-33, 34-35	1-3, 4-5, 6-8, 9-10, 30-31	11-12, 13-14, 23-24

CHAPITRE 4

DISCUSSION

4. Discussion

Cette recherche avait pour but d'étudier l'évolution de la productivité en forêt boréale naturelle du nord du Québec au cours des deux derniers siècles. Un protocole expérimental a été établi afin d'éliminer le plus possible de variables pouvant expliquer un écart éventuel de productivité. La part d'augmentation de la productivité due à des changements climatiques ou à une hausse de la concentration de CO₂ est l'objectif de cette étude. Par contre l'échantillonnage, l'écologie de l'épinette noire, sa dynamique de croissance et la dynamique des peuplements de cette espèce, de même que des facteurs externes peuvent apporter certains biais non négligeables et fausser certains résultats.

Les causes des changements dans la croissance sont multiples et très souvent indissociables. Il est en effet difficile d'isoler la part de la croissance découlant des changements à long terme de la productivité des sites qui sont uniquement dus à des changements environnementaux. Des changements de croissance causés par des événements épisodiques ou ponctuels, tels des changements climatiques (sécheresse, gel tardif, etc.), des maladies ou des épidémies d'insectes, ou à une combinaison et interaction de plusieurs facteurs peuvent ralentir la croissance des arbres pendant une période plus ou moins longue. Ce ralentissement de croissance se prolonge parfois pendant plusieurs années après qu'un événement se soit produit (Specker *et al.*, 1996).

Il apparaît donc ardu de cibler les causes exactes d'éventuels changements de croissance au fil des années. Toutefois, certaines pistes nous sont offertes afin d'expliquer ces changements. Des causes hypothétiques seront émises afin d'expliquer les résultats.

4.1. Les tendances à long terme de la croissance

Les résultats de nos analyses montrent pour les paramètres étudiés que 8 paires sur 10 (7 paires sur 10 pour la largeur de cerne) ont des courbes moyennes de croissance des arbres dominants des jeunes peuplements supérieures à celles des vieux peuplements du même âge (figures 2, 4, 5, 7, 8, 10). Toutes ces paires sont situées dans la forêt boréale du nord du Lac St-Jean, sauf pour le couple 30-31 situé sur la Côte-Nord. Le peuplement plus âgé de cette paire (30) a une très forte présence de kalmia à feuilles étroites (*Kalmia angustifolia* L.) en sous-étage. Cette plante est ubiquiste en forêt boréale. Elle se régénère de façon végétative après un feu. Elle est donc présente avant qu'un feu survienne. Elle occupe beaucoup de place si le couvert forestier est peu dense. Les plants de kalmia à feuilles étroites auraient pu être en compétition avec les jeunes pousses d'épinette noire juste après l'installation de celles-ci après feu. En effet, le kalmia s'établit généralement peu de temps après un feu.

Les deux autres paires qui ne présentent pas de différence de croissance sont aussi situées sur la Côte-Nord (32-33, 34-35). Les auteurs des prélèvements sur la Côte-Nord n'étaient pas les mêmes que ceux qui ont prélevé les échantillons situés au nord du Lac St-Jean, ce qui pourrait apporter un possible biais. Par contre, la méthodologie employée était stricte et clairement définie, ce qui rend presque nulles les possibilités de biais dans l'échantillonnage.

Dans les paires où on note une différence de croissance, les jeunes peuplements auraient eu une croissance juvénile plus rapide que celle des vieux. Cette différence de croissance aurait tendance à diminuer avec le temps (figures 2, 4, 5, 7, 8, 10). Cette différence de croissance juvénile expliquerait en grande partie pourquoi les jeunes ont une croissance supérieure aux vieux peuplements. Ils auraient gagné la course avec les vieux peuplements dès le début de leur existence. Ce qui a déjà été observé sur la croissance en hauteur de semis

d'épinette noire (Fantin, 1999) au nord-ouest du Lac St-Jean. Des événements bioclimatiques ont peut-être ralenti très fortement la phase rapide de la croissance juvénile des vieux peuplements et non celle des jeunes. Inversement, des événements bioclimatiques ont peut-être accéléré très fortement la croissance juvénile des jeunes peuplements et non celle des vieux.

4.2. *Le CO₂ et les dépôts azotés*

La différence de croissance entre les arbres dominants des jeunes et des vieux peuplements pourrait être expliquée par l'augmentation des concentrations de CO₂ depuis le siècle dernier. Tel qu'il a été mentionné précédemment, les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre ont considérablement augmenté en raison de l'accroissement des émissions causées par l'activité humaine depuis le 19^e siècle. Cela a entraîné une intensification de l'effet de serre. Les concentrations de dioxyde de carbone ont augmenté de 28% au cours des 200 dernières années à l'échelle planétaire (Environnement Canada, 1996).

Des études expérimentales sous des conditions optimales démontrent clairement qu'une élévation de la concentration de CO₂ atmosphérique augmente la photosynthèse et la croissance de plusieurs espèces végétales (Ackerly et Bazzaz, 1995). Une augmentation de la concentration de CO₂ ne se traduit pas nécessairement par une augmentation de la croissance. La disponibilité en eau et en éléments minéraux, la compétition inter et intra-spécifique, et l'ensoleillement peuvent être des facteurs limitants pouvant réduire ou annuler l'effet du CO₂ (Bazzaz, 1990). L'âge d'une espèce végétale peut également affecter l'utilisation du CO₂.

La plupart des travaux sur les effets d'une élévation de la concentration de CO₂ sur l'épinette noire ont été faits en serre (Lamhamedi et Bernier, 1994). Le CO₂ a été utilisé en serre sur de jeunes épinettes noires comme traitements culturaux. Dans toutes ces études, l'enrichissement de CO₂ a résulté en une augmentation de la biomasse des aiguilles, de la tige et des racines (Lamhamedi et Bernier, 1994). Les jeunes pousses d'épinette noire profiteraient d'une concentration plus élevée de CO₂ au début de leur existence (Daniel Lord, communication personnelle). Elles s'accoutumereraient ensuite à des concentrations plus élevées de CO₂, ce qui aurait moins d'effets sur la croissance.

Il est très difficile de quantifier le rôle exact de ces facteurs sur la physiologie et la croissance des arbres adultes en forêt naturelle (Becker *et al.*, 1995). Le contrôle et/ou l'isolement des variables affectant la croissance des arbres en forêt naturelle est très ardu. Le CO₂ pourrait n'être responsable que d'une partie des tendances observées, d'autres variables peuvent elles aussi être importantes (Becker *et al.*, 1995).

En pépinière, les semis d'épinette noire répondent très bien à une fertilisation azotée (Lamhamedi et Bernier, 1994). Une autre hypothèse pouvant expliquer une augmentation de la productivité depuis le siècle dernier est l'augmentation des dépôts azotés en forêt boréale. D'après les résultats des analyses de sol prélevé dans 14 placettes, toutes situées au nord du Lac St-Jean, aucune concentration anormalement élevée d'azote n'a été détectée. Par contre, l'azote pris en compte dans ces analyses de sol est l'azote total (donc presque exclusivement de l'azote organique dans ce type de sol). Il n'indique que très peu de chose quant au niveau des dépôts atmosphériques (Jean-Luc Dupouey, communication personnelle). Il faudrait donc plus étudier la qualité de cet azote (fractions, $\delta^{15}\text{N}$) ou le potentiel de minéralisation du sol. Comme il a été mentionné en introduction, il existe une dizaine de points de mesure qui montrent bien que les niveaux de dépôts azotés sont très faibles (moins de 5 kgN/ha/an) (Jean-Luc Dupouey,

communication personnelle), beaucoup plus faibles que ceux observés en Europe (de 5 à plus de 50 kgN/ha/an) (Badeau, 1995). De plus, l'impact significatif d'une éventuelle concentration anormalement élevée d'azote sur la croissance de l'épinette noire en forêt naturelle n'est pas encore connu.

Les facteurs déterminants pour la croissance de l'épinette noire seraient le régime hydrique, le contenu en éléments nutritifs du sol et l'épaisseur de l'humus (Lowry, 1975). La disponibilité des éléments minéraux, en grande partie immobilisés dans la couverture morte, contrôlerait la productivité des écosystèmes forestiers boréaux (Rowe et Scotter, 1973; Viereck, 1973; Van Cleve *et al.*, 1983; Viereck, 1983 ; Lussier, 1996). Par conséquent, l'effet d'une augmentation de la concentration de CO₂ sur les peuplements étudiés pourrait être annulé ou diminué par la disponibilité des éléments minéraux.

4.3. *La compétition inter et intra-spécifique*

Deux types de compétition sont généralement reconnus, soit la compétition *symétrique* et la compétition *asymétrique* (Weiner et Thomas, 1986). La compétition *symétrique* affecte de manière égale tous les individus du peuplement, comme par exemple la compétition pour les ressources minérales et hydriques. La compétition *asymétrique* est une compétition où les dominants profitent d'une part démesurée des ressources, comme par exemple la compétition pour le rayonnement solaire. Dans une étude réalisée par Lussier (1996) sur les structures diamétrales de pessières noires vierges âgées de 25 et 70 ans, la compétition serait du type *symétrique* plutôt qu'*asymétrique*. La compétition serait peu utile afin d'expliquer les différences de taille en diamètre entre les individus d'un même peuplement d'épinette noire (Lussier, 1996). La densité des peuplements vierges n'aurait donc pas d'influence significative sur la croissance en diamètre des épinettes noires âgées entre 25 et 70 ans (Lussier, 1996). Ceci

semble se confirmer par les résultats observés puisque les jeunes peuplements avaient une densité plus forte (tableau 4) que les peuplements plus âgés (à l'exception des paires 1-3 et 9-10 où les peuplements les plus âgés avaient la plus forte densité, et de la paire 23-24 où des données étaient manquantes). Cette forte densité aurait dû réduire la croissance des arbres dominants des jeunes peuplements par rapport aux dominants des vieux peuplements au même âge, ce qui n'a pas été observé.

Enfin, l'introduction ou la disparition de nouvelles espèces auraient une influence surtout sur la croissance juvénile. Les peuplements échantillonnés étaient des pessières noires presque pures. La méthodologie de la présente recherche éliminait les peuplements où l'épinette noire ne dominait pas largement. La présence d'une compétition inter-spécifique au stade juvénile au sein des peuplements ne peut être affirmée ou infirmée avec certitude, mais elle est peu probable si on se fie au patron d'évolution des pessières pures après feu (Lussier, 1996).

4.3.1. Dominances des tiges échantillonnées

Seuls les arbres dominants de chaque peuplement ont été échantillonnés. Or, un des biais d'échantillonnage pourrait être dû au fait que les arbres aujourd'hui dominants ne l'ont pas toujours été. Par contre, les changements de statut social dans un peuplement vierge d'épinette noire ne seraient pas significatifs (Lussier, 1996). En effet, les épinettes noires conserveraient leur statut social dans la population au fil des années. Badeau (1995) abonde dans le même sens, dans une étude sur le hêtre européen (*Fagus sylvatica* L.), en affirmant que le statut social d'un arbre semble être pour une large part un caractère acquis très tôt et peu susceptible d'évoluer, bien qu'il soit encore difficile de l'affirmer avec certitude.

Par ailleurs, le décès par le passé d'individus alors dominants dans un peuplement échantillonné aurait dû être observé. Toutefois, aucune tige morte de taille notable n'a été observée dans les peuplements échantillonnés. Comme le souligne Lussier (1996), la décomposition du bois est lente dans la région étudiée puisqu'elle est fortement ralentie par le climat froid et humide qui y sévit. Les tiges mortes auraient donc été encore visibles lors de l'échantillonnage puisque la décomposition du bois s'opère sur plusieurs décennies.

Les véritables arbres présentement dominants dans les peuplements devaient être sélectionnés, le diamètre étant le critère de choix. La taille de l'arbre sélectionné par rapport à ses voisins dans son environnement immédiat se devait d'être judicieux. Le choix de l'emplacement de la placette-échantillon s'avère donc primordial. Par contre, pour des raisons d'ordre pratique, les placettes ont plus souvent été délimitées près des chemins d'accès. Le transport des arbres échantillonnés à dos d'homme sur de grandes distances était impossible. Un choix aléatoire des placettes aurait peut-être apporté plus de précision.

4.3.2. Impact des épidémies de TBE sur la croissance au stade adulte

Idéalement, afin de comparer la croissance de jeunes et de vieux peuplements d'épinette noire, il fallait choisir des peuplements n'ayant subi aucunes perturbations au cours de leur existence afin de bien voir la part des facteurs environnementaux dans leur croissance.

Les diverses épidémies de TBE survenues par le passé sont venues modifier les patrons de croissance des arbres échantillonnés. Les épidémies de TBE ont peut-être eu des effets sur la dynamique de la compétition, comme le rapporte une étude de Newton et Jolliffe (1998) sur l'épinette noire à Terre-Neuve. D'après les graphiques de largeur de cerne au dhp, d'accroissement en hauteur et

d'accroissement en volume selon la date calendaire (figures 3, 6 et 9), les peuplements d'une même paire (et fort probablement toutes les tiges) semblent avoir été affectés de façon semblable par les épidémies de TBE. Des résultats similaires ont été obtenus par Lussier (1996) pour l'épinette noire. Lussier (1996) indique dans son étude que les épidémies de la TBE semblent avoir eu peu d'impact sur la structure diamétrale des peuplements, même si la majorité des arbres présentaient des ralentissements de croissance causés par la défoliation. Lussier (1996) mentionne également dans sa recherche que les plus petites tiges sont les plus vulnérables. Les plus petites tiges présentent les plus faibles reprises de croissance après une épidémie (Lussier, 1996; Newton et Jolliffe, 1998). Dans la présente étude, seuls les dominants ont été sélectionnés dans chaque placette, réduisant ainsi l'influence de ce facteur.

La défoliation par la TBE peut ralentir la croissance des épinettes noires et éventuellement réduire leur chance de survie (Lussier, 1996). La mortalité d'individus induite par les diverses épidémies de TBE au cours de la vie des peuplements échantillonnés aurait pu venir influencer la dynamique de compétition en créant des ouvertures qui auraient influencé la croissance des tiges résiduelles. Il s'agirait de petites tiges qui auraient eu peu d'influence sur les dominants. Comme il a été mentionné précédemment, aucune tige morte de taille notable n'a été observée dans les peuplements échantillonnés. De plus, les peuplements échantillonnés se composaient principalement d'épinettes noires, moins susceptibles à une mortalité par la TBE.

4.4. Le climat

Les conditions climatiques locales pourraient expliquer la différence de croissance observée pour 8 paires (7 pour la largeur de cerne). Puisque les jeunes peuplements de ces paires semblent avoir gagné la course dès le début de leur

existence, des conditions climatiques défavorables au moment de l'établissement des vieux peuplements ont pu ralentir leur croissance juvénile. Inversement, des conditions climatiques normales ou favorables au moment de l'établissement des jeunes peuplements n'auraient pas entravé ou auraient peut-être même accéléré leur croissance juvénile. Malgré les incertitudes liées à l'estimation de l'âge (discuté au point 4.5), tous les vieux peuplements étudiés se sont établis pendant le Petit âge glaciaire (1570-1880) (Lamb, 1977 *in* Lavoie et Payette, 1992), même ceux qui ne présentent pas de différence de croissance avec leurs jeunes peuplements respectifs (32 et 35). Ces deux paires qui ne présentent pas de différence de croissance sont situées sur la Côte-Nord (32-33, 34-35). Le Petit âge glaciaire était caractérisé par des hivers très froids et venteux, avec une mince couverture de neige, et des étés frais et humides (Payette *et al.*, 1985).

Tous les peuplements échantillonnés subissent un climat continental froid, même ceux situés sur la Côte-Nord. Un climat plus océanique qui aurait minoré les effets du Petit âge glaciaire dans cette région aurait pu être une hypothèse plausible afin d'expliquer l'absence d'écart de croissance observée. Les peuplements échantillonnés sur la Côte-Nord sont situés à plus de 120 kilomètres au nord du fleuve St-Laurent, éliminant ainsi cette hypothèse.

Il est par contre difficile de vérifier ces hypothèses. Les données météorologiques sont inexistantes à l'endroit même où les peuplements ont été échantillonnés. Certaines données sont disponibles mais pour des secteurs habités plus au sud. De plus, les registres météorologiques de ces secteurs sont trop courts et comportent des lacunes dans les séries de données (mois et années) (Deslauriers, 1999).

Des études dendroclimatologiques ont été entreprises pour la région du nord du Lac St-Jean sur l'épinette noire, mais elles ont été vaines (Cornélia Krause, communication personnelle). Des signaux climatiques contradictoires et quelques

fois difficilement explicables ont été observés pour cette espèce (C. Krause, communication personnelle). De plus, il est à se demander si des différences de température de plus ou moins 1° C peuvent expliquer un tel écart de croissance. En plus des lacunes quant aux données météorologiques, le passage des anciennes épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clem.) dans ce secteur vient brouiller le signal climatique. Ces épidémies ont pu ralentir ou arrêter la croissance radiale des épinettes noires pendant plusieurs années (Krause et Morin, 1995ab) et ce, indépendamment des conditions climatiques présentes à ce moment-là.

D'autres hypothèses peuvent expliquer d'une manière plus cohérente de telles différences de croissance observées, dont l'installation des semis en périodes d'épidémies de TBE.

4.5. Période d'installation des peuplements échantillonnés

Selon les plus récentes études, l'installation des semis d'épinette noire se produit sur une très courte période après un feu (Le Barron, 1939; Ahlgren, 1959; Black et Bliss, 1980; Viereck, 1983; St-Pierre *et al.*, 1992; Landhäusser et Wein, 1993; Duchesne et Sirois, 1995). Par contre, il est très difficile de retracer le véritable âge d'une épinette noire mature dû au phénomène de sous-estimation de l'âge. En effet, avec le vieillissement de l'arbre plusieurs phénomènes interviennent. L'épinette noire s'enfonce sous son propre poids dans le sol très organique. Les mousses et lichens se développent, faisant monter le niveau du sol. Des racines adventives se développent dans les niveaux bas du tronc, s'enfouissant progressivement.

Donc, l'âge pris à un niveau donné de référence par rapport au sol sous-estime l'âge réel de plus en plus fortement à mesure que l'arbre vieillit (Black et Bliss, 1980; Gagnon et Morin, 1992; Gagnon *et al.*, 1992; Riverin, 1994; Desrochers et Gagnon, 1997), le collet se retrouvant sous le niveau du sol (Desrochers et Gagnon, 1997). L'écart entre l'âge à la base de la souche d'une épinette noire et son âge réel pris au collet peut même atteindre jusqu'à 19 ans (Desrochers et Gagnon, 1997).

En conséquence, les arbres, autant les jeunes que les plus âgés, semblent plus jeunes et font croire à un rythme de croissance plus important. La productivité en est par conséquent surestimée. Étant donné que ce phénomène augmente avec l'âge, la véritable date d'installation serait encore plus ancienne pour les vieux peuplements. Ceci contribue à accentuer les écarts de croissance observés avec les jeunes peuplements à un âge donné. Les courbes de croissance des vieux peuplements seraient alors décalées de quelques années vers la droite (figures 2, 4, 5, 7, 8 et 10).

La véritable date d'établissement des peuplements est donc inconnue. Par conséquent, il est impossible d'affirmer avec certitude si ces peuplements se sont établis pendant une décennie précise. Par contre, il est possible d'affirmer avec plus de certitude si ces peuplements se sont établis pendant une période climatique favorable ou défavorable ou pendant une période d'épidémie de TBE.

4.6. *Installation en périodes d'épidémies de TBE*

Comme le souligne Fournier (1997), la croissance des épinettes noires de petites tailles (moins de 1 m au moment de l'épidémie) de secondes venues peut être affectée par la TBE, retardant ainsi la croissance de celles-ci, au même titre que

les arbres adultes (Raske et Sutton, 1986 ; Lussier *et al.*, 1992; Miller et Rusnock, 1993 ; Basham, 1994; Lussier, 1996; Desrochers et Gagnon, 1997).

Cette défoliation par la TBE affecterait les petites tiges d'épinette noire de seconde venue d'une manière irrégulière (Fournier, 1997), et modifierait donc la dynamique hiérarchique des peuplements au stade juvénile. Aucune étude ne vient confirmer cette tendance pour de très jeunes peuplements vierges issus de graines. La croissance des jeunes peuplements pourrait être encore plus affectée par une défoliation par la TBE durant leur croissance exponentielle (Hubert Morin, communication personnelle).

Deux périodes de défoliation par la TBE seraient survenues au 18^e siècle dans la région étudiée (Krause, 1997). La première entre 1710 et 1716, et la deuxième entre 1754 et 1759. Au 19^e siècle, deux périodes de défoliation sont survenues (1811-1813 et 1835-1841), et probablement une troisième (1868-1878) (Krause, 1997). Trois périodes de défoliation par la TBE se seraient produites au 20^e siècle dans l'Est du Canada (Blais, 1983; Morin et Laprise, 1990). Ces épidémies se seraient produites au nord du Lac St-Jean entre 1910 et 1924, 1946 et 1955, et entre 1972 et 1984 (Morin et Laprise, 1990). La plupart des peuplements de cette présente étude semblent avoir subi des ralentissements de croissance en relation avec les périodes épidémiques du 20^e siècle (figure 3, 6 et 9).

Les résultats démontrent que 8 paires sur 10 (7 sur 10 pour la largeur de cerne) ont des courbes moyennes de croissance des arbres dominants des jeunes peuplements supérieures à celles des vieux peuplements au même âge (figures 2, 4, 5, 7, 8, 10). Dans ce même groupe, 4 paires sur 8 (1-3, 6-8, 11-12, 23-24) ont des vieux peuplements qui se sont établis durant une épidémie de TBE dans la région étudiée (Morin et Laprise, 1990 ; Krause, 1997). Inversement, les jeunes peuplements de ces 4 paires se seraient établis entre deux épidémies de TBE, ce

qui pourrait expliquer en partie les différences de croissance entre jeunes et vieux peuplements (tableau 8).

Les vieux peuplements des trois autres paires de ce groupe (4-5, 9-10, 13-14) ont une partie de leur croissance juvénile qui se serait produite durant une épidémie, ce qui pourrait également expliquer les différences de croissance observées. Par contre, pour ces trois paires, les attaques auraient pu intervenir aux mêmes âges (4-5, 9-10), voire plus précocement dans le jeune peuplement (13-14). Le rôle des épidémies de TBE dans les différences de croissance observées ne serait probablement que partiel.

Toutefois, la véritable date d'installation de ces peuplements d'épinette noire est inconnue. Il est donc difficile de confirmer avec certitude si ces peuplements se sont établis pendant une période d'épidémie de TBE qui aurait ralenti leur croissance. Par contre, ils ont probablement eu une partie de leur croissance juvénile qui s'est produite durant une épidémie, sans savoir exactement laquelle.

Tableau 8. Épidémies de la TBE et période d'établissement des peuplements.

Peuplement	Groupe d'âge (Jeune ou Vieux)	Date d'installation (date calendaire)	Âge le plus ancien (année)	Date possible d'épidémie de TBE (date calendaire)	Âge possible lors de la première attaque de TBE (année)
1	Jeune	1938	57	1910-1924	8-17
3	Vieux	1870	125	1868-1878	0-8
4	Jeune	1939	56	1910-1924	7-16
5	Vieux	1859	136	1868-1878	9-19
6	Jeune	1938	57	1910-1924	8-17
8	Vieux	1871	124	1868-1878	0-7
9	Jeune	1926	69	1910-1924	20-29
10	Vieux	1791	204	1811-1813	20-22
12	Jeune	1927	68	1910-1924	19-28
11	Vieux	1754	241	1754-1759	0-5
14	Jeune	1923	72	1910-1924	0-1
13	Vieux	1770	225	1811-1813	41-43
23	Jeune	1961	34	1972-1984	11-23
24	Vieux	1876	119	1868-1878	0-2
31	Jeune	1913	84	Aucune	n.a.
30	Vieux	1772	225	Aucune	n.a.
33	Jeune	1925	72	Aucune	n.a.
32	Vieux	1839	158	Aucune	n.a.
34	Jeune	1921	76	Aucune	n.a.
35	Vieux	1814	183	Aucune	n.a.

L'impact de la TBE est peut-être plus lié à une hauteur des semis d'épinette noire qu'à un âge physiologique.

Les deux paires qui ne présentent pas de différence de croissance sont situées sur la Côte-Nord (32-33, 34-35). Selon Blais (1983), la Côte-Nord n'aurait subi aucune invasion d'envergure par la TBE depuis la fin du dix-neuvième siècle, à part la dernière dans les années 1970. Blais (1983) note que par le passé, la Côte-Nord n'offrait pas des conditions très propices aux pullulations de cet insecte. Tous les peuplements de ces paires n'auraient donc pas subi de défoliation importante par la TBE (à part la dernière épidémie dans les années 1970 et peut-être celle des années 1910 pour les paires 32-33 et 34-35), ce qui pourrait peut-être expliquer l'absence de différence de croissance.

4.7. Autres facteurs

D'autres facteurs ont pu influencer les résultats obtenus dans cette recherche. L'intensité des feux n'a peut-être pas été la même pour tous les peuplements affectant ainsi le niveau de compétition après feu, la fertilité des sols, le niveau de régénération, etc. Le hasard peut évidemment expliquer une partie du biais. C'est la part non explicative de la croissance.

La variabilité génétique est le potentiel génétique de chaque arbre. Elle n'apporte probablement pas une influence significative et surtout quantifiable sur les résultats. La grande quantité d'arbres échantillonnés (5 arbres par site, 100 arbres en tout) fait en sorte que l'on présume que cette variabilité est constante dans le temps.

L'intensité d'échantillonnage par site (5 arbres dominants) peut paraître insuffisante si l'on considère qu'un peuplement correspond à la superficie d'un

incendie forestier d'un seul tenant, ce qui est généralement une grande superficie. Toutefois, plusieurs sites ont été échantillonnés (20) couvrant, d'ouest en est, une grande amplitude géographique.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

5. Conclusion

Les forestiers sont intéressés par la productivité des forêts. Le développement des forêts d'aujourd'hui, les taux de croissance, la composition en espèces, la longévité et la biomasse totale ont été largement dictés par les conditions climatiques, passées et présentes (Jozsa et Powell, 1987). De meilleures connaissances sur les tendances à long terme dans la croissance des peuplements forestiers sont nécessaires pour un aménagement à rendement soutenu et la disponibilité de matière ligneuse (Spiecker *et al.*, 1996).

Même si les causes pouvant expliquer une différence de croissance sont multiples et indissociables dans le cadre de cette recherche, les résultats de nos analyses démontrent que 8 paires sur 10 (7 paires sur 10 pour la largeur de cerne) ont des courbes de croissance des arbres dominants des jeunes peuplements supérieures à celles des vieux peuplements à un même âge. L'hypothèse de départ est donc infirmée puisqu'en l'absence de fertilisation azotée et d'interventions humaines, aucune différence de croissance n'aurait dû être observée. L'établissement des vieux peuplements au moment d'une période climatique défavorable (Petit âge glaciaire) ou d'une épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette est considéré comme une des hypothèses principales pouvant expliquer une différence de croissance. Une augmentation du CO₂ atmosphérique et de la température sont également des hypothèses pouvant expliquer une augmentation de la croissance. Ces résultats devraient être le prélude à des recherches plus approfondies sur l'évolution de la productivité des forêts boréales naturelles au cours des dernières décennies.

L'utilisation d'une espèce non-hôte de la TBE ou d'une espèce très rarement affectée par des insectes ou des maladies permettrait d'éliminer une des variables pouvant expliquer une différence de croissance à long terme. De plus, une

espèce dont la véritable date d'établissement est facilement identifiable apporterait beaucoup de précision aux résultats, si la même méthodologie employée pour cette recherche est utilisée. D'autres méthodes existent afin de déterminer d'éventuelles dérives positives de la croissance à long terme (Becker *et al.*, 1995) et valent la peine d'être étudiées pour être appliquées à la forêt boréale québécoise.

CHAPITRE 6

REFERENCES

6. Références

- Ackerly, D.D. et F.A. Bazzaz. Plant growth and reproduction along CO₂ gradients: non-linear responses and implications for community change. *Global Change Biology* 1: 199-207, 1995.
- Ahlgren, C.E. Some effects of fire on forest reproduction in Northeastern Minnesota. *Journal of Forestry* 57: 194-202, 1959.
- Badeau, V., J.-L. Dupouey, M. Becker, et J.F. Picard. Long-term growth trends of *Fagus sylvatica* L. in northeastern France. A comparison between high and low density stands. *Acta Oecologica* 16: 571-583, 1995.
- Badeau, V. Étude dendroécologique du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) sur les plateaux calcaires de Lorraine. Influence de la gestion sylvicole. 238 p. 1995. Thèse de PhD, Université Henri Poincaré de Nancy I.
- Basham, J. T. Black spruce annual volume losses to pests estimated at 30% of current annual increment in Ontario. Canadian Forestry Service. Technical note No.76. 4 p. 1994. Ontario, Natural Ressources Canada.
- Bazzaz, F.A. The response of natural ecosystems to the rising global CO₂ level. *Annual Review of Ecology and Systematics* 21: 167-196, 1990.
- Becker, M., O.U. Bräcker, G. Kenk, O. Schneider, et F.H. Schweingruber. Aspect des houppiers et croissance des arbres au cours des dernières décennies dans les régions frontalières d'Allemagne, de France et de Suisse. *Revue forestière française* 42: 284-300, 1990.

Becker, M., D. Bert, J. Bouchon, J.-L. Dupouey, J.F. Picard, et E. Ulrich. Long-term changes in forest productivity in Northeastern France: the dendroecological approach. In: *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains.*, edited by Springer. Berlin: 1995, p. 143-156.

Bert, D. Silver fir (*Abies alba* Mill.) shows an increasing long term trend in the Jura mountains. In: *Tree rings and Environment, Proc Intern Dendrochronological Symposium*, Ystad, Sweden, 3-9 sept. 1990. Lundqua Report 34, 27-29. 1992.

Black, R.A. et L.C. Bliss. Reproductive ecology of *Picea mariana* (Mill.) BSP. at tree line near Inuvik, Northwest Territories, Canada. *Ecological Monographs* 50: 331-354, 1980.

Blais, R. Les forêts de la Côte Nord au Québec sont-elles sujettes aux déprédateurs par la tordeuse? *The Forestry Chronicle* 17-20, 1983.

Briffa, K. R. Increasing productivity of 'natural growth' conifers in Europe over the last century. In: *Tree rings and Environment, Proc Intern Dendrochronological Symposium*, Ystad, Sweden, 3-9 sept. 1990. Lundqua Report 34, 64-71. 1992

D'Arrigo, R.D., G.C. Jacoby, et I.Y. Fung. Boreal forests and atmosphere-biosphere exchange of carbon dioxide. *Nature* 239: 321-323, 1987.

D'Arrigo, R.D., G.C. Jacoby, et R.M. Free. Tree-ring width and maximum latewood density at the North American tree line : parameters of climatic change. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 1290-1296, 1992.

Deslauriers, A. Mise en place du cerne de croissance chez le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) et relation avec le climat local. 71 p. 1999. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi.

Desrochers, A. et R. Gagnon. Is ring count at ground level a good estimation of black spruce age? *Canadian Journal of Forest Research* 27: 1263-1267, 1997.

Duchesne, S. et L. Sirois. Phase initiale de régénération après feu des populations conifériennes subarctiques. *Canadian Journal of Forest Research* 25: 307-318, 1995.

Dyer, M.E. et R.L. Bailey. A test of six methods for estimating true heights from stem analysis data. *Forest Science* 33: 3-13, 1987.

Environnement Canada. Le changement climatique. 96-4. 1996.

Eriksson, H. et U. Johansson. Yields of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in two consecutive rotation in southwestern Sweden. *Plant and Soil* 154: 239-247, 1993.

Fantin, N. Croissance juvénile des arbres mères comparées à celle de jeunes semis d'épinette noire (*Picea Mariana* (MILL) B.S.P.) issus de graines après feu sur un même site. 66 p. 1999. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi.

Fournier, M. Structure et croissance d'un peuplement d'épinette noire (*Picea Mariana* (MILL) B.S.P.) issu d'une coupe d'une vingtaine d'années dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. 107 p. 1997. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi.

Gagnon, R., Morin, H., St-Pierre, H., Filion, J., et Villeneuve, G. La régénération naturelle de l'épinette noire par graines : point de départ d'une méthode efficace d'ensemencement. Division de recherche et de développement sur les semences, les boutures et les plants du Service de l'amélioration des arbres et Service du transfert de technologie. Pages 171-180. 1992. Sainte-Foy, Ministère des Forêts.

Gagnon, R. et Morin, H. Establishment period of black spruce (*Picea mariana*) after fire. In: *Tree rings and Environment, Proc Intern Dendrochronological Symposium*, Ystad, Sweden, 3-9 sept. 1990. Lundqua Report 34, 112-114. 1992.

Gouvernement du Québec. Plan d'action québécois de mise en oeuvre de la Convention-Cadre des Nations-Unies sur les changement climatiques. Bibliothèque nationale du Québec. EN960564. 37 p. 1996. Québec.

Graumlich, L.J., L.B. Brubaker, et C.C. Grier. Long-term trends in forest net primary productivity : Cascade Mountains, Washington. *Ecology* 70: 405-410, 1989.

Hari, P., H. Arovaara, T. Raunemaa, et A. Hautojärvi. Forest growth and the effects of energy production : a method for detecting trends in the growth potential of trees. *Canadian Journal of Forest Research* 14: 437-440, 1984.

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

Jacoby, G.C., R.D. D'Arrigo, et T. Davaajamts. Mongolian tree rings and 20th-century warming. *Science* 273: 771-773, 1996.

Jozsa, L.A. et J.M. Powell. Some climatic aspects of biomass productivity of white spruce stem wood. *Canadian Journal of Forest Research* 17: 1075-1079, 1987.

Kauppi, P.E., K. Mielikäinen, et K. Kuusela. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. *Science* 256: 70-74, 1992.

Kotar, M. Volume and height growth of fully stocked mature beech stands in Slovenia during the past three decades. In : *Growth trends in European forests*. Berlin: Springer-Verlag, 1996, p. 291-312.

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

Krause, C. et H. Morin (b). Impact of spruce budworm defoliation on the number of latewood tracheids in balsam fir and black spruce. *Canadian Journal of Forest Research* 25: 2029-2034, 1995.

Krause, C. The use of dendrochronological material from buildings to get information about past spruce budworm outbreaks. *Canadian Journal of Forest Research* 27: 69-75, 1997.

Lamarche, V.C., D.A. Graybill, H.C. Fritts, et M.R. Rose. Increasing atmospheric carbon dioxide : tree ring evidence for growth enhancement in natural vegetation. *Science* 225: 1019-1021, 1984.

Lamhamedi, M.S. et P.Y. Bernier. Ecophysiology and field performance of black spruce (*Picea mariana*) : a review. *Annales des sciences forestières* 51: 529-551, 1994.

Landhäuser, S.M. et R.W. Wein. Postfire vegetation recovery and tree establishment at the Arctic treeline : climate-change-vegetation-response hypotheses. *Journal of Ecology* 81: 665-672, 1993.

Lavoie, C. et S. Payette. Black spruce growth forms as a record of a changing winter environment at treeline, Quebec, Canada. *Arctic and Alpine Research* 24: 40-49, 1992.

Lavoie, C. et S. Payette. Recent fluctuation of the lichen-spruce forest limit in subarctic Québec. *Journal of Ecology* 82: 725-734, 1994.

LeBarron, R.K. The role of forest fires in the reproduction of black spruce. *The Minnesota Academy of Science, Proceedings* 7: 11-14, 1939.

Lowry, G.L. Black spruce productivity as related to soil and other site factors. *Soil Science Society of America Proceedings* 39: 125-131, 1975.

Lussier, J.-M. Comparaison de la croissance de marcottes d'épinette noire adultes à celle d'individus issus de graines après feu. 62 p. 1991. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi.

Lussier, J.-M., H. Morin, et R. Gagnon. Comparaison de la croissance de marcottes d'épinette noire (*Picea mariana*) adultes après coupe à celle d'individus issus de graines après feu. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 1524-1535, 1992.

Lussier, J.-M. Reconstitution de la dynamique récente de pessières noires vierges et de seconde venue. 125 p. 1996. Thèse de PhD, Université du Québec à Montréal.

Mielikänen, K. et Timonen, M. Growth trends of Scots pine (*Pinus sylvestris*, L.) in unmanaged and regularly managed stands in Southern and Central Finland. In : *Growth trends in European forests*. Berlin: Springer-Verlag, 1996, p. 41-59.

Miller, A. et P. Rusnock. The rise and fall of the silvicultural hypothesis in spruce budworm (*Choristoneura fumiferana*) management in eastern Canada. *Forest Ecology and Management* 61: 171-189, 1993.

Montero, G., Rojo, A., et Elena, R. Case studies of growing stock and height growth evolution in Spanish forests. In : *Growth trends in European forests*. Berlin: Springer-Verlag, 1996, p. 313-328.

Morin, H. et D. Laprise. Histoire récente des épidémies de la Tordeuse des bourgeons de l'épinette au nord du lac Saint-Jean (Québec): une analyse dendrochronologique. *Canadian Journal of Forest Research* 20: 1-8, 1990.

Newton, P.F. et P.A. Jolliffe. Temporal size-dependent growth responses within density-stressed black spruce stands : competition processes and budworm effects. *Forest Ecology and Management* 111: 1-13, 1998.

Payette, S., L. Filion, L. Gauthier, et Y. Boutin. Secular climate change in old-growth tree-line vegetation of northern Quebec. *Nature* 315: 135-138, 1985.

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

Peterson, D.L., M.J. Arbaugh, L.J. Robinson, et B.R. Derderian. Growth trends of whitebark pine and lodgepole pine in a subalpine Sierra Nevada forest, California, U.S.A. *Arctic and Alpine Research* 22: 233-243, 1990.

Raske, A. G. et Sutton, W. J. Decline and mortality of black spruce caused by spruce budworm defoliation and secondary organisms. Canadian Forestry Service. N-X-236. 29 p. 1986. St-John's, Newfoundland forestry Centre.

Riverin, S. Dynamique d'installation de la régénération dans une pessière ouverte à cladonie localisée dans la zone de la pessière noire fermée, Nord du Saguenay-Lac-Saint-Jean. 66 p. 1994. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi.

Rowe, J. S. Les régions forestières du Canada. Publication numéro 1300F. 172 p. 1972. Ministère de l'Environnement, service canadien des forêts.

Rowe, J.S. et G.W. Scotter. Fire in the Boreal Forest. *Quaternary research* 3: 444-464, 1973.

Schweingruber, F.H., K.R. Briffa, et P. Nogler. A tree-ring densiometric transect from Alaska to Labrador. *International Journal of Biometeorology* 37: 151-169, 1993.

Spiecker, H. Which trees represent stand growth? In: *Tree rings and Environment, Proc Intern Dendrochronological Symposium*, Ystad, Sweden, 3-9 sept. 1992. Lundqua Report 34, 308-312.

Spiecker, H. Growth dynamics in a changing environment - long-term observations. *Plant and Soil* 168-169: 555-561, 1995.

Spiecker, H., K. Mielikäinen, M. Köhl, et J. Skovsgaard. *Growth trends in European forests*. Berlin: Springer-Verlag, 1996, p. 1-372.

St-Pierre, H., R. Gagnon, et P. Bellefeuille. Régénération après feu de l'épinette noire (*Picea mariana*) et du pin gris (*Pinus banksiana*) dans la forêt boréale, Québec. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 474-481, 1992.

Vaganov, E.A. Cells of tree rings reflect the rise in air temperature during this century. *Doklady Biological Sciences* 351: 281-283, 1996.

Van Cleve, K., L. Oliver, R. Schlientner, L.A. Viereck, et C.T. Dyrness. Productivity and nutrient cycling in taiga forest ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research* 13: 747-766, 1983.

Viereck, L.A. Wildfire in the Taiga of Alaska. *Quaternary research* 3: 465-495, 1973.

Viereck, L.A. The effects of fire in black spruce ecosystems of Alaska and Northern Canada. In: *The role of fire in northern circumpolar ecosystems*, edited by R.W. Wein and D.A. MacLean. New-York: John Wiley and Sons, 1983, p. 201-220.

Weiner, J. et S.C. Thomas. Size variability and competition in plant monocultures.
Oikos 47: 211-222, 1986.