

# Modèles de croissance internodale pour l'épinette noire, le pin gris et le sapin baumier au Québec

par Daniel Mailly<sup>1,2</sup> et Mélanie Gaudreault<sup>1</sup>

## RÉSUMÉ

L'objet de cette étude était de mettre au point des modèles de croissance internodale variable pour les principales essences résineuses du Québec, selon l'approche méthodologique de Nigh (1997a). Au total, 83 placettes d'analyse de tiges d'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] BSP), 68 de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) et 70 de sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill) ont été utilisées. En se basant sur la racine carrée des erreurs quadratiques moyennes, les modèles de croissance internodale pour l'épinette noire se sont avérés les plus précis; venaient ensuite ceux du pin gris et finalement ceux du sapin baumier. La précision obtenue se compare très bien à celle des modèles déjà publiés pour plusieurs autres essences que l'on retrouve au Canada. Une validation provisoire a également démontré que l'erreur d'estimation moyenne de l'indice de qualité de station était relativement faible pour les trois essences et qu'elle n'entraînait pas de répercussions pratiques sur le terrain. Une collecte de données additionnelle devrait toutefois être réalisée afin de poursuivre les tests de validation.

**Mots-clés :** croissance internodale, épinette noire, indice de qualité de station, modèle, pin gris, régression non linéaire, sapin baumier

## ABSTRACT

The objective of this study was to develop variable growth intercept models for coniferous species of major importance in Quebec using Nigh's (1997a) modelling technique. Eighty-three, 68 and 70 stem analysis plots of black spruce (*Picea mariana* [Mill.] BSP), jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) and balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill) were used, respectively. The growth intercept models for black spruce were the most precise, followed by those for jack pine and finally by those for balsam fir, based on the root mean square errors. Results indicated that the accuracy of the models was good, relative to those previously published for other species in Canada. Interim testing of the models revealed a low mean error for all three species that may not be of practical significance for site index determination, although more data should be obtained to further test the models.

**Key words:** balsam fir, black spruce, growth intercept, jack pine, model, nonlinear regression, site index



Daniel Mailly



Mélanie Gaudreault

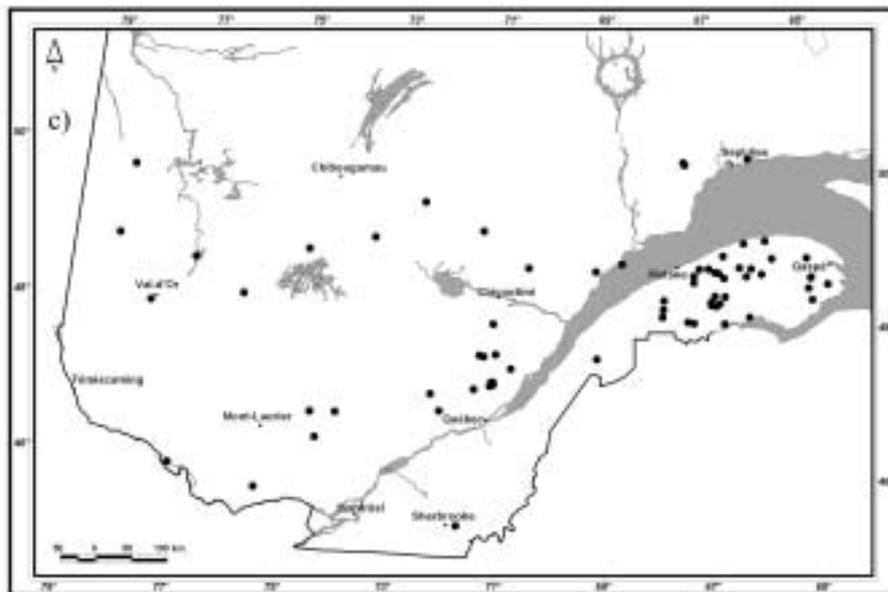
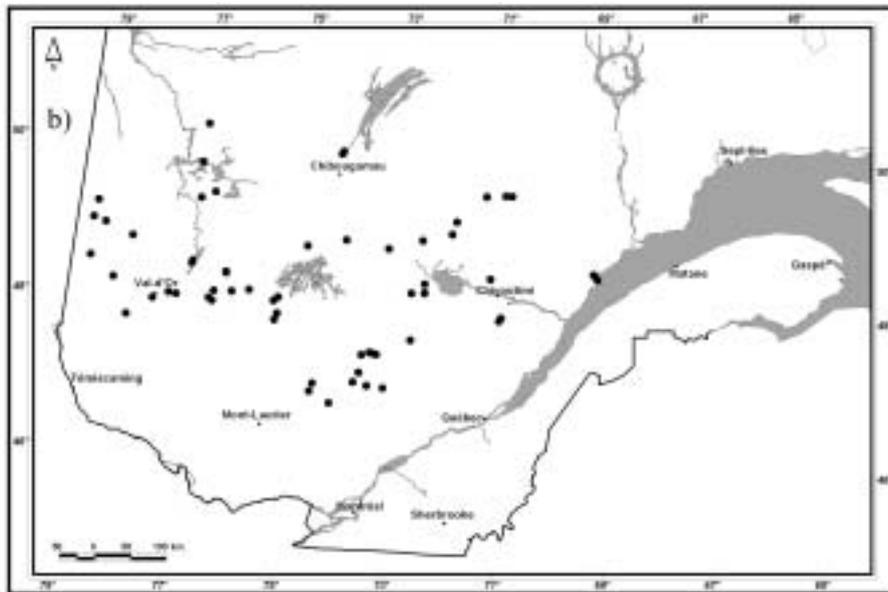
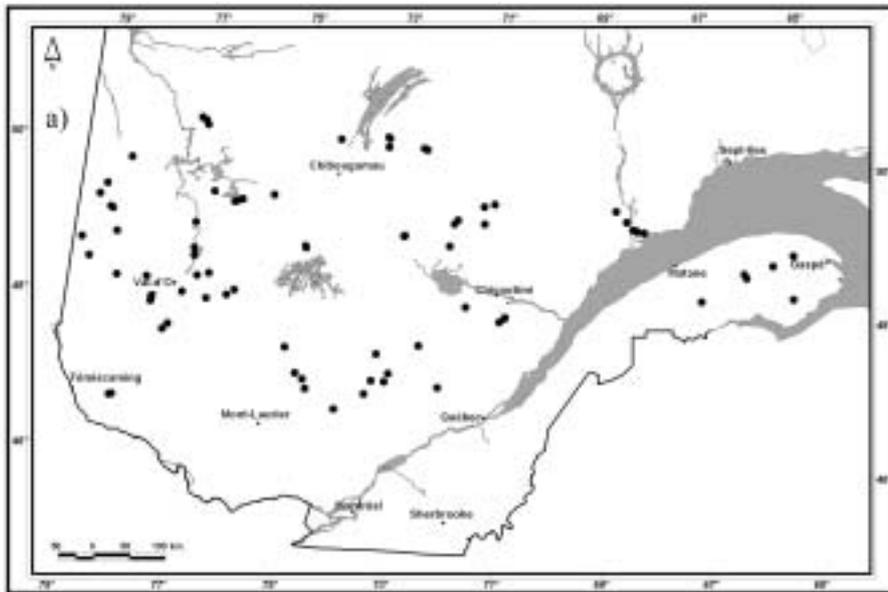
## Introduction

Au Québec, l'indice de qualité de station a traditionnellement été estimé à partir de courbes hauteur-âge (voir, par exemple, Vézina et Linteau 1968, Boudoux 1978, Pothier et Savard 1998). Bien que ces courbes soient des outils relativement efficaces pour évaluer l'indice de qualité de station dans les peuplements mûrs, elles sont peu fiables dans le cas des jeunes peuplements, soit ceux qui ont moins de 20 ans d'âge à hauteur de poitrine (Nigh 1995). Hors du Québec, on utilise de plus en plus les modèles de croissance internodale variable pour obtenir des estimations fiables de l'indice de qualité de station des jeunes peuplements, en mettant en relation la croissance en hauteur annuelle moyenne des arbres avec l'indice de qualité de station. Ces modèles ont les avantages suivants: 1) ils sont conçus spécialement pour l'estimation de l'indice de qualité de station et non de la hauteur; 2) ils sont destinés aux jeunes peuplements; 3) ils ne sont pas réduits à prendre la valeur de l'indice de qualité de station à l'âge correspondant à cet indice; 4) ils sont moins sensibles aux petites erreurs de mesure de la hauteur moyenne que les modèles hauteur-âge (Nigh 1996).

La mise au point de modèles de croissance internodale pour l'épinette noire, le pin gris et le sapin baumier s'avère

<sup>1</sup>Direction de la recherche forestière, Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8, Canada.

<sup>2</sup>Toute correspondance doit être adressée au premier auteur. Courriel : daniel.mailly@mrnfp.gouv.qc.ca



**Fig. 1.** Localisation des placettes-échantillons pour: a) l'épinette noire (n = 83), b) le pin gris (n = 68) et c) le sapin baumier (n = 70) au Québec.

Tableau 1. Données récapitulatives sur les placettes-échantillons

	Épinette noire (n = 83)			Pin gris (n = 68)			Sapin baumier (n = 70)			
	Âge (ans)	Hauteur (m)	IQS (m)	Âge (ans)	Hauteur (m)	IQS (m)	Âge (ans)	Hauteur (m)	IQS (m)	
					Âge à 1,0 m					
Moyenne	75	16,5	13,1	67	18,2	16,5	65	16,2	13,5	
Écart type	25	2,5	2,8	16	2,7	2,5	13	2,4	3,1	
Minimum	46	10,5	5,7	46	12,2	11,6	46	10,3	5,7	
Maximum	154	22,3	17,1	115	22,5	21,8	103	21,5	19,6	
					Âge à 1,3 m					
Moyenne	74	16,5	13,5	66	18,2	16,7	63	16,2	13,8	
Écart type	24	2,5	2,7	16	2,7	2,5	12	2,4	3,0	
Minimum	45	10,5	6,4	45	12,2	11,7	45	10,3	6,3	
Maximum	151	22,3	17,2	114	22,5	21,9	98	21,5	20,2	

nécessaire en raison de l'importance commerciale de ces essences pour l'approvisionnement en bois au Québec. Les modèles de croissance internodale actuellement disponibles ont été mis au point en Colombie-Britannique pour le Douglas vert (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco var. *menziesii*; Nigh 1997a), le pin tordu latifolié (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud. var. *latifolia* Engelm.; Nigh 1997b), le Douglas bleu (*Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* [Beissn.] Franco; Nigh 1997c), la pruche de l'Ouest de la zone intérieure (*Tsuga heterophylla* [Raf.] Sarg.; Nigh 1998), les épinettes de la zone intérieure (*Picea glauca* [Moench] Voss, *Picea engelmannii* Parry ex Engelm. et *Picea glauca* x *engelmannii*; Nigh 1999), la pruche de l'Ouest de la zone côtière (*Tsuga heterophylla* [Raf.] Sarg.; Nigh 1999), l'épinette de Sitka (*Picea sitchensis* [Bong.] Carrière; Nigh 1999), le mélèze de l'Ouest (*Larix occidentalis* Nutt.; Nigh et al. 1999), le thuya géant (*Thuja plicata* Donn ex D. Don; Nigh 2000), l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] BSP; Nigh et Klinka 2001), le pin ponderosa (*Pinus ponderosa* P. Laws. ex C. Laws; Nigh 2002) et l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss; Nigh 2004).

L'objet de cette étude était de mettre au point des modèles de croissance internodale pour l'épinette noire, le pin gris et le sapin baumier au Québec. L'étude avait également pour objectif d'effectuer une validation provisoire des modèles à partir de données indépendantes. En général, la technique de modélisation suit de très près celle de Nigh (1997a), qu'on devra consulter pour avoir plus de renseignements.

## Matériel et Méthodes

### Collecte des données

Les données de cette étude ont été obtenues suite à l'échantillonnage de 83 placettes d'épinette noire, 68 de pin gris et 70 de sapin baumier. Les placettes étaient uniformément réparties dans l'ensemble de l'aire de distribution provinciale de chaque espèce (Fig. 1). Elles ont été remesurées ou établies en conformité avec les procédures recommandées pour les placettes-échantillons permanentes du Québec (ministère des Ressources naturelles du Québec 2001).

Les placettes étaient circulaires, d'une taille de 0,04 ha, et étaient situées dans des secteurs écologiquement homogènes où l'espèce visée prédominait. Lors de l'établissement d'une

placette, les arbres de l'essence dominante ayant les trois plus grands diamètres (diamètre mesuré à 130 cm de hauteur,  $D_{130}$ ; Brokaw et Thompson 2000) ont été choisis comme arbres-échantillons. Lors du remesurage d'une placette-échantillon permanente du réseau de la Direction des inventaires forestiers (ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec), les arbres ont été sélectionnés à l'extérieur de la placette; ils devaient alors être situés à une distance minimale équivalant à la hauteur de l'arbre dominant et avoir des diamètres ( $D_{130}$ ) semblables à ceux des trois plus gros arbres de la placette.

Avant d'abattre un arbre, une carotte était prélevée à 0,75 m de hauteur pour vérifier s'il avait subi une période de ralentissement de croissance juvénile. Si c'était le cas, un arbre dominant de même diamètre ( $D_{130}$ ) n'ayant subi aucun ralentissement de croissance était sélectionné pour le remplacer. Les arbres sélectionnés ont été abattus et des sections de tige ont été prélevées à hauteur de souche (0,15 m), 0,60 m, 1 m, 1,30 m, 2 m et ensuite à tous les 1 m ou 2 m de distance. Le logiciel WINDENDRO™ (Guay et al. 1992) a été utilisé pour mesurer les accroissements annuels en diamètre et le logiciel COFECHA (Holmes 1983) a permis l'interdatation entre les sections de tige. Les données des sections ont ensuite été converties en couples de données hauteur-âge par interpolation linéaire avec le logiciel ANATI (Tardif 2001) et analysées en utilisant le progiciel SAS (SAS Institute Inc. 1999). Les caractéristiques des peuplements échantillonnés sont présentées dans le Tableau 1.

### Modélisation de la croissance internodale

La méthode utilisée pour l'analyse des données était semblable à celle de Nigh (1997a). La principale différence consistait en l'utilisation d'une hauteur de référence de 1,0 m, qui est la norme au Québec, en plus de la hauteur de référence de 1,3 m, généralement utilisée dans les autres provinces. L'étude a donc fourni deux ensembles d'équations de croissance internodale. Afin d'améliorer la clarté du texte, l'âge mesuré à 1,0 m (100 cm) a été désigné par « âge<sub>100</sub> » et l'âge mesuré à 1,3 m (130 cm), par « âge<sub>130</sub> ».

Les couples de données hauteur-âge ont été reliés graphiquement pour chaque arbre et chaque placette. Les données s'étendant au-delà de 50 ans ont été omises puisqu'elles n'ont pas été utilisées pour l'analyse finale. Les

arbres présentant une croissance anormale ont également été écartés de l'analyse, de même que les placettes qui comptaient moins de deux arbres convenables. De façon générale, les arbres rejetés étaient ceux ayant été incapables de maintenir une croissance en hauteur constante (typique des arbres dominants) ou ceux ayant souffert d'une épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (le sapin baumier et l'épinette noire seulement). De plus, les hauteurs de certains arbres âgés entre 45 à 50 ans ont été extrapolées en utilisant le modèle de Chapman-Richards (Fekedulegn *et al.* 1999) sur la base des dix dernières années de croissance. Pour les âges<sub>100</sub>, cette méthode a permis de conserver 6 placettes d'épinette noire, 12 de pin gris et 14 de sapin baumier. Pour les âges<sub>130</sub>, 9 placettes d'épinette noire, 13 de pin gris et 15 de sapin baumier ont été préservées grâce à cette technique.

La croissance en hauteur moyenne a ensuite été calculée par placette. L'indice de qualité de station correspondait à la hauteur moyenne dominante atteinte à 50 ans, à 1,0 m ou à 1,3 m. La croissance internodale a finalement été calculée selon l'équation 1, pour chaque âge<sub>100</sub> et âge<sub>130</sub> de 1 à 50 :

$$CI_A = \frac{H_A - HR}{A - A_0} \cdot 100 \quad [1]$$

Dans cette équation,  $CI_A$  représente la croissance internodale (cm/an) pour l'âge ( $A$ ) = 1, 2, ..., 50 (ans),  $H_A$  est la hauteur moyenne (m) à l'âge  $A$ ,  $HR$  est la hauteur de référence pour la lecture de l'âge (1,0 ou 1,3 m), et  $A_0$  est un facteur d'ajustement de l'âge qui permet de tenir compte du fait que la première année de croissance en hauteur au-dessus de la hauteur de référence est généralement incomplète,  $H_0$  et  $H_1$  étant les hauteurs de l'arbre situées immédiatement au-dessous et au-dessus de la hauteur de référence :

$$A_0 = \frac{HR - H_0}{H_1 - H_0} \quad [2]$$

Les croissances internodales de toutes les placettes ont été rattachées à l'indice de qualité de station pour chaque âge<sub>100</sub> et âge<sub>130</sub>, selon le modèle de croissance internodale variable de Nigh (1997a) :

$$IQS = HR + e^{b_1} \cdot (CI_A)^{b_2} \quad [3]$$

Dans cette équation,  $IQS$  est l'indice de qualité de station,  $CI_A$  est la croissance internodale (cm/an) pour l'âge  $A$  à la hauteur de référence ( $HR$ ), et  $b_1$  et  $b_2$  sont les paramètres du modèle.

Un ensemble de paramètres a été estimé pour chaque âge<sub>100</sub> et âge<sub>130</sub> entre 1 et 50 ans selon la procédure NLIN de SAS. Une analyse des résidus a été effectuée pour confirmer les hypothèses de régression de non biais, de normalité et d'homoscédasticité (Ratkowski 1983, Sen et Srivastava 1990). Chaque modèle a été soumis à l'analyse pour le biais (un test de  $t$  pour vérifier si la moyenne des résidus était significativement différente de zéro), la normalité avec la statistique  $W$  (Shapiro et Wilk 1965), l'homoscédasticité

avec la statistique  $F_k$  (Endrenyi et Kwong 1981), la non-linéarité des effets intrinsèques et paramétriques (Bates et Watts 1980) et les biais de paramètres (Box 1971).

#### Validation provisoire des modèles

De nombreuses placettes examinées dans le cadre de la présente étude ont été rejetées parce qu'elles ne satisfaisaient pas à tous les critères de sélection (par exemple, certaines comportaient des arbres ayant eu une croissance en hauteur irrégulière). Par conséquent, toutes les placettes d'inventaire ont servi à la phase d'étalonnage et aucune n'est restée disponible pour la validation. Des données indépendantes ont donc été utilisées pour tester les modèles de croissance internodale. Ces données avaient été récoltées pour la mise au point de nouvelles courbes hauteur-âge par type écologique (J. P. Saucier, communication personnelle), mais convenaient pour une validation provisoire des modèles puisqu'elles avaient été recueillies selon les mêmes procédures.

L'ensemble de données indépendantes consistait en 30 placettes d'analyse de tiges d'épinette noire, 5 de pin gris et 40 de sapin baumier, toutes établies en 2002 dans les sous-domaines bioclimatiques de la sapinière à bouleau jaune et de la sapinière à bouleau blanc (Saucier *et al.* 1998). Afin d'effectuer la validation des modèles de croissance internodale, l'indice de qualité de station réel a tout d'abord été déterminé pour chaque placette indépendante; il correspondait à la hauteur moyenne atteinte à 50 ans. Ensuite, un indice de qualité de station a été calculé pour les mêmes placettes et pour chaque âge de 1 à 50 ans, en utilisant les modèles de croissance internodale précédemment mis au point. Finalement, la moyenne des erreurs d'estimation (indice de qualité de station réel - indice de qualité de station calculé) a été déterminé pour chaque âge, afin d'observer la variation survenue lors de l'estimation de l'indice de qualité de station avec les modèles (Nigh et Martin 2001). Pour un âge donné, une erreur supérieure à zéro indique que le modèle sous-estime l'indice de qualité de station.

#### Résultats

Les Tableaux 2 et 3 présentent les estimations paramétriques des modèles de croissance internodale [3] pour les âges allant de 1 à 50 ans pour l'épinette noire, le pin gris et le sapin baumier. La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne, qui est une mesure d'exactitude du modèle, y est également montrée. Les résultats des tests de biais, de normalité, d'homoscédasticité, de non-linéarité des effets intrinsèques et paramétriques et de biais paramétriques sont résumés ci-après :

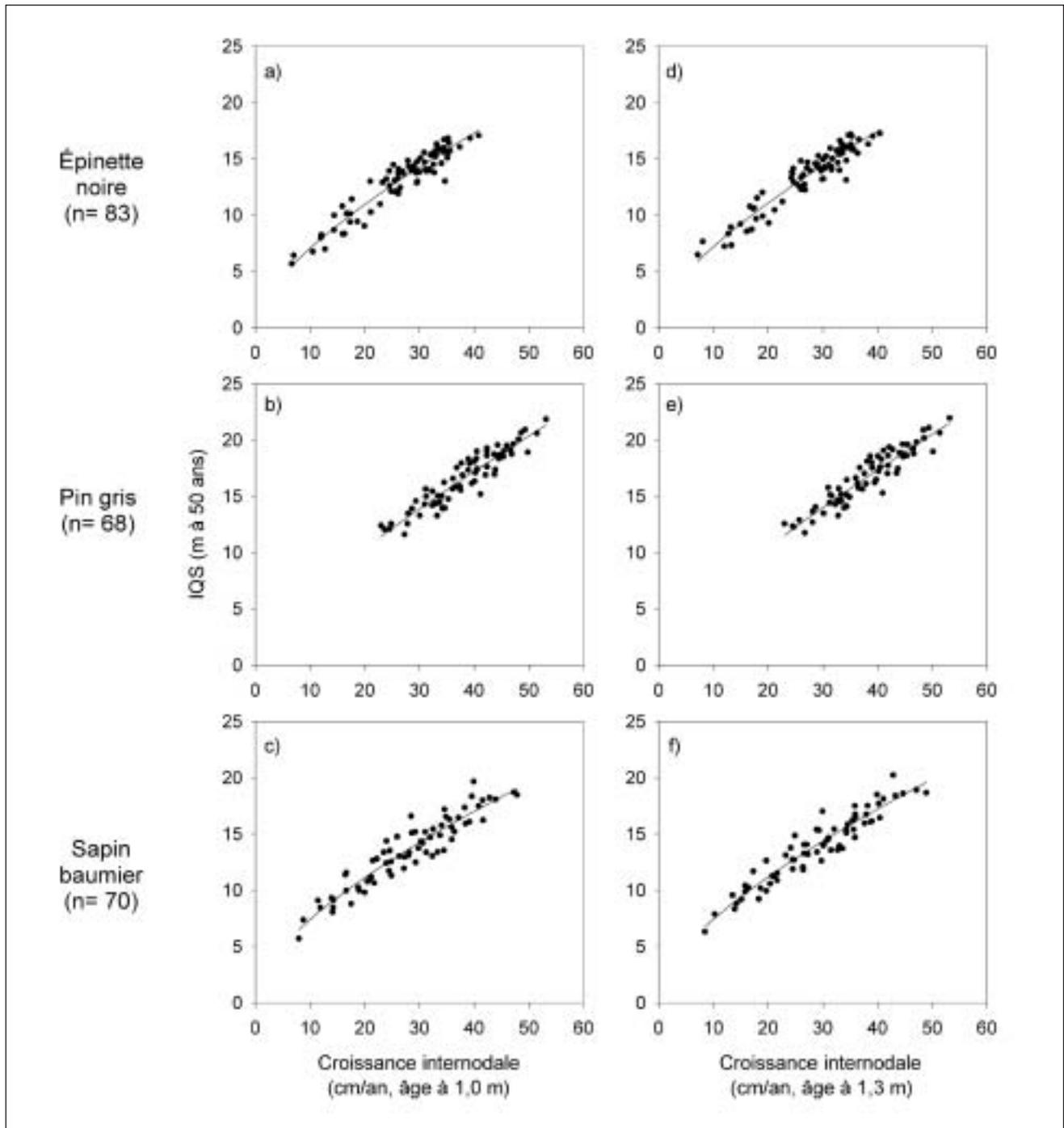
- **Biais** : aucun modèle ne s'est avéré biaisé.
- **Normalité** : les modèles pour les âges<sub>100</sub> 10, 11 (l'épinette noire) et 50 (le pin gris) et pour les âges<sub>130</sub> 2 à 7 (l'épinette noire), 50 (le pin gris) et 44 à 47 (le sapin baumier) ont montré un léger signe de non-normalité ( $0,004 < p < 0,05$ ).
- **Homoscédasticité** : le test  $F_k$  a indiqué des signes d'hétéroscedasticité pour les modèles concernant les âges<sub>100</sub> 2, 31 à 35 (l'épinette noire), 5 (le pin gris) et 50 (le sapin baumier) et les âges<sub>130</sub> 28 à 31 (l'épinette noire) et 50 (le sapin baumier), mais une analyse graphique a

Tableau 2. Modèles de croissance internodale et racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) pour les âges 1 à 50 à la hauteur de 1,0 m

Âge à 1,0 m (années)	Épinette noire			Pin gris			Sapin baumier		
	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	REQM	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	REQM	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	REQM
1	1,4487	0,3676	1,9063	1,6884	0,3003	2,2085	1,5451	0,3393	2,3553
2	1,2960	0,4092	1,7134	1,3427	0,3928	1,9462	1,4724	0,3568	2,3920
3	1,1842	0,4383	1,5287	1,3201	0,3929	1,8052	1,4941	0,3448	2,3624
4	1,0451	0,4760	1,4053	1,2334	0,4151	1,7209	1,5017	0,3379	2,3486
5	0,9463	0,5026	1,3605	1,1269	0,4439	1,6436	1,4965	0,3368	2,3616
6	0,8754	0,5213	1,3290	1,0483	0,4657	1,5543	1,4582	0,3470	2,3500
7	0,8134	0,5374	1,2958	0,9747	0,4857	1,4530	1,3943	0,3651	2,2992
8	0,7673	0,5484	1,2709	0,9100	0,5029	1,3676	1,3354	0,3813	2,2464
9	0,7357	0,5547	1,2508	0,8661	0,5145	1,3194	1,2869	0,3943	2,2082
10	0,7165	0,5573	1,2362	0,8251	0,5254	1,2827	1,2352	0,4080	2,1606
11	0,6884	0,5633	1,2116	0,7757	0,5386	1,2468	1,1743	0,4243	2,0968
12	0,6467	0,5738	1,1791	0,7242	0,5527	1,2201	1,1146	0,4404	2,0286
13	0,6036	0,5851	1,1468	0,6757	0,5659	1,1998	1,0543	0,4567	1,9520
14	0,5610	0,5967	1,1172	0,6208	0,5808	1,1900	0,9946	0,4732	1,8781
15	0,5203	0,6078	1,0941	0,5644	0,5963	1,1801	0,9319	0,4906	1,8034
16	0,4789	0,6194	1,0701	0,5076	0,6117	1,1612	0,8678	0,5084	1,7235
17	0,4386	0,6307	1,0471	0,4406	0,6301	1,1342	0,8111	0,5241	1,6539
18	0,4015	0,6412	1,0309	0,3718	0,6490	1,1025	0,7609	0,5376	1,5876
19	0,3647	0,6518	1,0184	0,2958	0,6699	1,0773	0,7153	0,5498	1,5237
20	0,3250	0,6633	1,0010	0,2113	0,6934	1,0532	0,6624	0,5643	1,4475
21	0,2853	0,6749	0,9763	0,1281	0,7166	1,0284	0,6012	0,5817	1,3661
22	0,2490	0,6856	0,9520	0,0462	0,7395	0,9992	0,5370	0,6004	1,2959
23	0,2133	0,6963	0,9297	-0,0309	0,7613	0,9677	0,4700	0,6203	1,2263
24	0,1772	0,7073	0,9037	-0,1046	0,7823	0,9351	0,3964	0,6422	1,1446
25	0,1467	0,7166	0,8764	-0,1604	0,7984	0,8993	0,3308	0,6618	1,0674
26	0,1155	0,7262	0,8466	-0,1965	0,8093	0,8699	0,2729	0,6795	1,0044
27	0,0800	0,7373	0,8137	-0,2281	0,8191	0,8460	0,2199	0,6959	0,9415
28	0,0444	0,7484	0,7789	-0,2638	0,8301	0,8239	0,1699	0,7114	0,8794
29	0,0094	0,7595	0,7438	-0,3043	0,8424	0,7959	0,1190	0,7272	0,8288
30	-0,0254	0,7707	0,7119	-0,3461	0,8551	0,7611	0,0700	0,7423	0,7902
31	-0,0610	0,7823	0,6826	-0,3788	0,8653	0,7252	0,0217	0,7574	0,7545
32	-0,0968	0,7940	0,6552	-0,4021	0,8730	0,6891	-0,0338	0,7747	0,7100
33	-0,1354	0,8067	0,6268	-0,4285	0,8817	0,6530	-0,0939	0,7935	0,6656
34	-0,1777	0,8205	0,5965	-0,4525	0,8898	0,6169	-0,1551	0,8127	0,6270
35	-0,2181	0,8338	0,5655	-0,4738	0,8974	0,5800	-0,2131	0,8309	0,5904
36	-0,2565	0,8465	0,5322	-0,4951	0,9051	0,5447	-0,2662	0,8478	0,5524
37	-0,2952	0,8594	0,4935	-0,5098	0,9112	0,5124	-0,3172	0,8641	0,5119
38	-0,3321	0,8716	0,4511	-0,5231	0,9170	0,4778	-0,3630	0,8789	0,4759
39	-0,3674	0,8835	0,4100	-0,5388	0,9236	0,4412	-0,4017	0,8917	0,4412
40	-0,4025	0,8952	0,3710	-0,5531	0,9300	0,4066	-0,4329	0,9025	0,4053
41	-0,4357	0,9065	0,3342	-0,5731	0,9381	0,3723	-0,4600	0,9122	0,3687
42	-0,4686	0,9177	0,3001	-0,5997	0,9481	0,3368	-0,4839	0,9210	0,3344
43	-0,5030	0,9294	0,2666	-0,6252	0,9580	0,3014	-0,5083	0,9299	0,3022
44	-0,5362	0,9408	0,2309	-0,6493	0,9676	0,2624	-0,5341	0,9393	0,2675
45	-0,5671	0,9516	0,1932	-0,6701	0,9764	0,2201	-0,5618	0,9493	0,2297
46	-0,5950	0,9615	0,1561	-0,6843	0,9833	0,1787	-0,5934	0,9604	0,1893
47	-0,6218	0,9712	0,1196	-0,6951	0,9893	0,1390	-0,6208	0,9703	0,1499
48	-0,6466	0,9802	0,0857	-0,7007	0,9937	0,1000	-0,6441	0,9790	0,1097
49	-0,6713	0,9892	0,0535	-0,7053	0,9979	0,0635	-0,6681	0,9880	0,0689
50	-0,6953	0,9980	0,0321	-0,7121	1,0028	0,0454	-0,6939	0,9976	0,0356

Tableau 3. Modèles de croissance internodale et racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) pour les âges 1 à 50 à la hauteur de 1,3 m

Âge à 1,3 m (années)	Épinette noire			Pin gris			Sapin baumier		
	$b_1$	$b_2$	REQM	$b_1$	$b_2$	REQM	$b_1$	$b_2$	REQM
1	0,8756	0,5171	1,5386	1,3075	0,3915	1,8974	1,3848	0,3660	2,3793
2	0,7715	0,5414	1,4193	1,2953	0,3901	1,7552	1,4829	0,3311	2,4508
3	0,7269	0,5543	1,4046	1,2308	0,4086	1,6841	1,4947	0,3267	2,4687
4	0,7066	0,5598	1,3913	1,1231	0,4383	1,6134	1,4991	0,3248	2,4715
5	0,6742	0,5688	1,3621	1,0250	0,4658	1,5198	1,4395	0,3429	2,4256
6	0,6449	0,5763	1,3302	0,9561	0,4848	1,4200	1,3484	0,3698	2,3528
7	0,6340	0,5774	1,3051	0,8949	0,5014	1,3506	1,2686	0,3928	2,2814
8	0,6322	0,5756	1,2822	0,8499	0,5135	1,3046	1,2159	0,4074	2,2256
9	0,6340	0,5727	1,2661	0,8045	0,5257	1,2677	1,1656	0,4208	2,1633
10	0,6115	0,5775	1,2371	0,7502	0,5405	1,2349	1,1132	0,4348	2,0937
11	0,5717	0,5879	1,2000	0,7042	0,5531	1,2152	1,0578	0,4499	2,0194
12	0,5309	0,5991	1,1672	0,6573	0,5660	1,2017	0,9963	0,4669	1,9351
13	0,4945	0,6092	1,1414	0,6054	0,5802	1,1956	0,9346	0,4839	1,8502
14	0,4612	0,6184	1,1230	0,5431	0,5974	1,1871	0,8768	0,4999	1,7802
15	0,4246	0,6288	1,0994	0,4884	0,6124	1,1674	0,8256	0,5142	1,7233
16	0,3889	0,6391	1,0738	0,4286	0,6288	1,1434	0,7761	0,5279	1,6613
17	0,3555	0,6487	1,0575	0,3609	0,6474	1,1173	0,7266	0,5415	1,5978
18	0,3226	0,6583	1,0479	0,2861	0,6680	1,0947	0,6727	0,5565	1,5242
19	0,2871	0,6690	1,0302	0,1963	0,6930	1,0688	0,6162	0,5723	1,4448
20	0,2516	0,6796	1,0039	0,1110	0,7167	1,0390	0,5526	0,5906	1,3672
21	0,2215	0,6887	0,9819	0,0333	0,7385	1,0081	0,4833	0,6110	1,2919
22	0,1926	0,6977	0,9611	-0,0463	0,7611	0,9738	0,4118	0,6322	1,2079
23	0,1612	0,7075	0,9356	-0,1253	0,7837	0,9408	0,3420	0,6530	1,1175
24	0,1284	0,7177	0,9059	-0,1832	0,8005	0,9077	0,2816	0,6715	1,0431
25	0,0927	0,7289	0,8708	-0,2201	0,8117	0,8788	0,2244	0,6891	0,9716
26	0,0570	0,7402	0,8343	-0,2499	0,8210	0,8586	0,1693	0,7062	0,9024
27	0,0206	0,7517	0,8010	-0,2812	0,8308	0,8390	0,1134	0,7236	0,8397
28	-0,0165	0,7636	0,7705	-0,3193	0,8425	0,8130	0,0583	0,7407	0,7860
29	-0,0565	0,7765	0,7386	-0,3602	0,8551	0,7797	0,0129	0,7549	0,7503
30	-0,0998	0,7904	0,7063	-0,3910	0,8648	0,7458	-0,0323	0,7692	0,7209
31	-0,1435	0,8046	0,6745	-0,4124	0,8721	0,7123	-0,0877	0,7867	0,6809
32	-0,1866	0,8187	0,6426	-0,4313	0,8788	0,6760	-0,1464	0,8051	0,6419
33	-0,2252	0,8315	0,6115	-0,4497	0,8854	0,6400	-0,2044	0,8236	0,6096
34	-0,2595	0,8431	0,5805	-0,4695	0,8925	0,6028	-0,2559	0,8401	0,5796
35	-0,2934	0,8546	0,5473	-0,4887	0,8997	0,5672	-0,3023	0,8552	0,5483
36	-0,3279	0,8662	0,5086	-0,5021	0,9055	0,5355	-0,3462	0,8696	0,5138
37	-0,3609	0,8774	0,4675	-0,5151	0,9112	0,5017	-0,3805	0,8812	0,4827
38	-0,3943	0,8887	0,4282	-0,5307	0,9179	0,4658	-0,4091	0,8913	0,4512
39	-0,4269	0,8998	0,3907	-0,5453	0,9243	0,4326	-0,4338	0,9002	0,4197
40	-0,4582	0,9106	0,3556	-0,5674	0,9330	0,3996	-0,4562	0,9085	0,3868
41	-0,4898	0,9215	0,3225	-0,5956	0,9436	0,3649	-0,4810	0,9176	0,3564
42	-0,5207	0,9323	0,2875	-0,6204	0,9534	0,3312	-0,5092	0,9278	0,3271
43	-0,5495	0,9425	0,2525	-0,6431	0,9626	0,2947	-0,5380	0,9381	0,2955
44	-0,5761	0,9521	0,2190	-0,6636	0,9713	0,2546	-0,5637	0,9475	0,2648
45	-0,6002	0,9610	0,1855	-0,6764	0,9779	0,2158	-0,5857	0,9559	0,2325
46	-0,6229	0,9694	0,1523	-0,6840	0,9830	0,1783	-0,6070	0,9641	0,1977
47	-0,6440	0,9774	0,1188	-0,6891	0,9874	0,1400	-0,6290	0,9724	0,1578
48	-0,6656	0,9856	0,0842	-0,6948	0,9919	0,0985	-0,6538	0,9817	0,1125
49	-0,6870	0,9937	0,0492	-0,7030	0,9972	0,0588	-0,6804	0,9916	0,0637
50	-0,7063	1,0013	0,0272	-0,7132	1,0033	0,0361	-0,7047	1,0008	0,0297

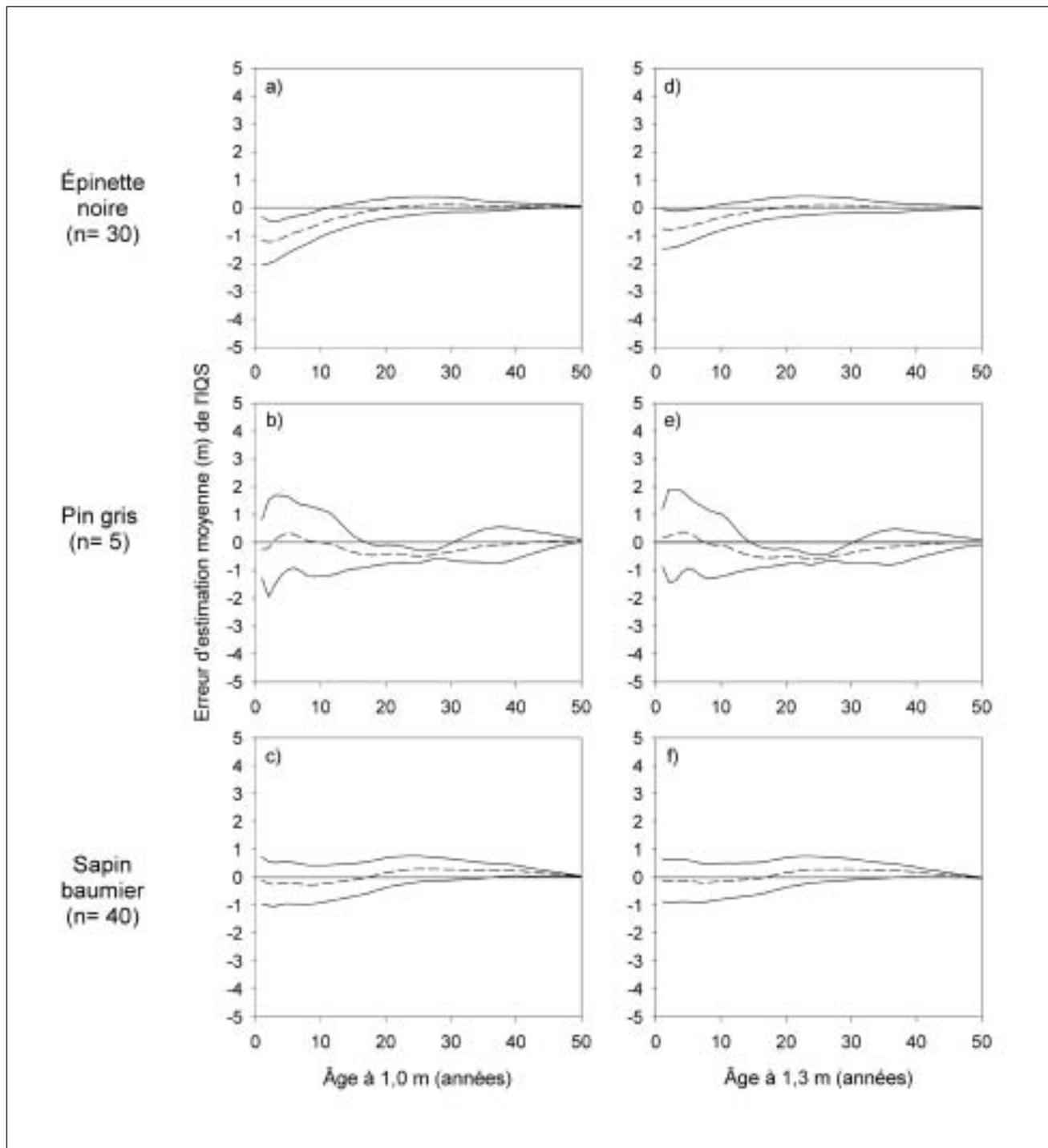


**Fig. 2.** Relation entre l'indice de qualité de station et la croissance internodale à 25 ans pour l'épinette noire (a, d), le pin gris (b, e) et le sapin baumier (c, f). La hauteur de référence utilisée pour la lecture de l'âge est de 1,0 m pour les graphiques a, b et c, et de 1,3 m pour les graphiques d, e et f..

- montré que la distribution des résidus était satisfaisante.
- *Non-linéarité des effets intrinsèques et paramétriques:* les mesures de non-linéarité ont indiqué que les modèles suivaient une trajectoire linéaire (Ratkowski 1983).
  - *Biais paramétriques:* les biais paramétriques étaient inférieurs à 1 %, sauf pour les âges<sub>100</sub> 28 à 30 (l'épinette noire), 23 (le pin gris) et 31, 32 (le sapin baumier) et pour les âges<sub>130</sub> 26 à 29 (l'épinette noire), 21 (le pin gris) et 29, 30 (le sapin baumier).
- Les tests de biais, de normalité et d'homoscédasticité ont

montré que les hypothèses de régression des moindres carrés (Sen et Srivastava 1990) étaient, en général, respectées de manière satisfaisante. La Fig. 2 présente de façon graphique les modèles de croissance internodale ajustés à 25 ans pour l'épinette noire, le pin gris et le sapin baumier.

La Fig. 3 montre l'erreur d'estimation moyenne (ligne pointillée) ainsi que les intervalles de confiance de la moyenne à un niveau de 95 % (lignes continues) qui ont été obtenus suite à la validation des modèles de croissance internodale pour l'épinette noire, le pin gris et le sapin



**Fig. 3.** Erreur moyenne (ligne pointillée) et intervalles de confiance à 95 % de l'erreur moyenne (lignes continues) pour l'épinette noire (a, d), le pin gris (b, e) et le sapin baumier (c, f). La hauteur de référence utilisée pour la lecture de l'âge est de 1,0 m pour les graphiques a, b et c, et de 1,3 m pour les graphiques d, e et f.

baumier pour les âges 1 à 50. Il est possible d'observer un biais dans l'estimation de l'indice de qualité de station lorsque les deux intervalles de confiance se retrouvent du même côté de la ligne zéro de l'erreur moyenne. La validation des modèles pour l'épinette noire a révélé que pour les âges<sub>100</sub> inférieurs à 12 ans (Fig. 3a), l'erreur d'estimation moyenne étaient significativement différente de zéro et que les modèles pouvaient être biaisés.

Cependant, le biais estimé était plus grand qu'un mètre uniquement pour les âges<sub>100</sub> inférieurs à 5 ans. L'erreur d'estimation moyenne pour les âges<sub>130</sub> inférieurs à 8 ans (Fig. 3d) était aussi significativement différente de zéro; dans ces cas, les modèles surestimaient l'indice de qualité de station réel d'environ 50 cm. En moyenne, l'amplitude de l'erreur se situait entre 15 et 30 cm pour les deux hauteurs de référence. La validation des modèles pour le pin gris a

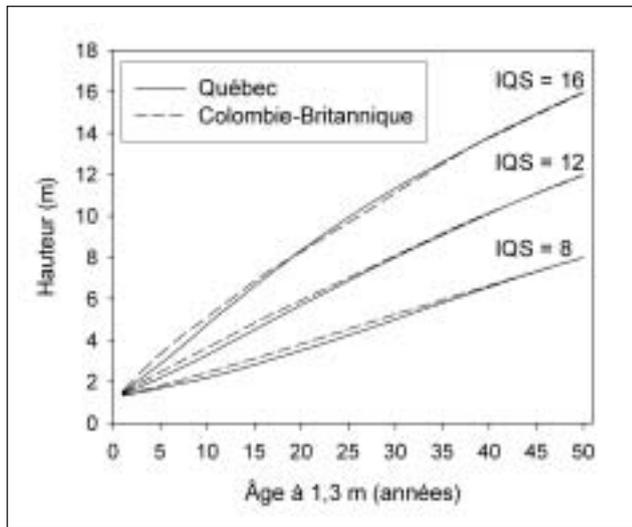


Fig. 4. Modèles de croissance internodale inversés pour l'épinette noire au Québec (ligne continue) et en Colombie-Britannique (ligne pointillée) pour les indices de qualité de station 8, 12 et 16.

montré que l'erreur d'estimation moyenne pour les âges<sub>100</sub> (Fig. 3b) entre 17 et 30 ans et pour l'âge<sub>100</sub> à 50 ans différait significativement de zéro. De la même manière, l'erreur d'estimation moyenne pour les âges<sub>130</sub> entre 15 et 30 (Fig. 3e) était significativement différente de zéro. En moyenne, l'amplitude de l'erreur se situait entre 20 et 30 cm pour les deux hauteurs de référence. Finalement, la validation des modèles pour le sapin baumier a permis de constater que l'erreur d'estimation moyenne pour les âges<sub>100</sub> (Fig. 3c) entre 37 et 50 ans et les âges<sub>130</sub> entre 37 et 45 ans (Fig. 3f) était significativement différente de zéro. En moyenne, l'amplitude de l'erreur se situait entre 15 et 20 cm pour les deux hauteurs de référence.

## Discussion

La présente étude a permis d'ajuster des modèles de croissance internodale pour l'épinette noire, le pin gris et le sapin baumier, à deux hauteurs de référence (1,0 m et 1,3 m) différentes. Les modèles pour l'épinette noire se sont avérés les plus précis; venaient ensuite ceux du pin gris et finalement ceux du sapin baumier (voir la Fig. 3 et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne dans les Tableaux 2 et 3). La précision des modèles était bonne comparativement à celle obtenue pour d'autres essences. D'une façon générale, les modèles de croissance internodale présentés dans cette étude étaient aussi précis que ceux de Colombie-Britannique pour l'épinette noire (Nigh et Klinka 2001), le pin tordu latifolié (Nigh 1997b) et le thuya géant (Nigh 2000), mais ils étaient légèrement plus précis que ceux mis au point pour les épinettes de la zone intérieure (Nigh 1999), la pruche de l'Ouest de la zone intérieure (Nigh 1998), le Douglas vert (Nigh 1997a), la pruche de l'Ouest de la zone côtière (Nigh 1999), le Douglas bleu (Nigh 1997c), l'épinette de Sitka (Nigh 1999), le mélèze de l'Ouest (Nigh *et al.* 1999) et le pin ponderosa (Nigh 2002). La précision des modèles augmentait avec l'âge de l'arbre (Nigh *et al.* 1999), ce qui est typique des modèles de croissance internodale.

Cette étude a montré que le modèle de croissance internodale variable proposé par Nigh (1997a) peut

s'appliquer à l'épinette noire, le pin gris et le sapin baumier du Québec. L'équation utilisée a permis de produire des courbes bien ajustées aux données, ce qui est caractéristique des modèles de croissance internodale variable (Fig. 2 et Nigh 1999). La relation entre l'indice de qualité de station et les longueurs de pousse annuelle (croissance internodale) était légèrement curviligne (Fig. 2), ce qui indique qu'une augmentation dans la taille de la pousse annuelle correspond à une augmentation progressivement plus petite de l'indice de qualité de station. Ceci démontre que les arbres qui croissent sur de bons sites atteignent un taux de croissance en hauteur maximal plus tôt que les arbres qui croissent sur des sols pauvres (Thrower 1987).

En vue de l'application de la méthode de croissance internodale, les forestiers pourraient être intéressés à connaître l'âge à partir duquel l'erreur d'estimation de l'indice de qualité de station se situe sous un certain seuil. Il est possible de connaître cette précision en considérant la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne des Tableaux 2 et 3, laquelle donne une approximation de l'amplitude de l'erreur d'estimation de l'indice de qualité de station qu'on peut observer dans 95 % des cas (Nigh 1998). Pour obtenir un indice de qualité de station ayant une précision de 2 m, les relevés sur les peuplements ne doivent donc pas se faire avant 20 ans pour l'épinette noire, 22 ans pour le pin gris et 26 ans pour le sapin baumier lorsque l'âge de référence est de 1,0 m. De la même manière, les relevés sur les peuplements ne doivent pas se faire avant 20 ans pour l'épinette noire, 21 ans pour le pin gris et 25 ans pour le sapin baumier si l'âge de référence est de 1,3 m.

La validation des modèles pour l'épinette noire a démontré que l'erreur d'estimation moyenne diminuait avec l'âge, pour les deux hauteurs de référence, ce qui indique qu'il est possible de se servir des modèles de croissance internodale dans les jeunes peuplements, mais que les indices de qualité de station estimés pour ces âges pourraient être moins fiables. On peut conclure, suite à la validation provisoire, que certains biais existent dans les modèles. Toutefois, la faible amplitude de l'erreur d'estimation moyenne ( $\pm 30$  cm) mesurée pour les trois essences ne risque pas d'entraîner d'incidence pratique sur le terrain (ministère des Ressources naturelles du Québec 2000). Bien qu'une analyse graphique ait montré que les données utilisées pour la conception et la validation des modèles étaient similaires pour tous les âges, on considère la validation comme provisoire car les placettes utilisées provenaient de deux sous-domaines bioclimatiques seulement (sapinière à bouleau jaune et sapinière à bouleau blanc). De plus, comme la taille d'échantillon pour le pin gris était très petite, les modèles de croissance internodale pour cette essence requièrent une nouvelle validation à partir d'un plus grand ensemble de données indépendantes.

Puisque des modèles de croissance internodale pour l'épinette noire sont également disponibles en Colombie-Britannique (Nigh et Klinka 2001), une comparaison a été effectuée avec ceux mis au point au Québec. Pour ce faire, les modèles des deux provinces ont été inversés afin de relier la hauteur à l'âge (de 1 à 50 ans), pour les indices de qualité de station 8, 12 et 16 (Fig. 4). La comparaison a révélé des similarités entre les courbes hauteur-âge, particulièrement entre 35 et 50 ans, ce qui a permis de confirmer que le patron de croissance en hauteur de l'épinette noire est

relativement semblable d'une région à l'autre du Canada (Nigh *et al.* 2002). Cependant, le taux de croissance en hauteur juvénile s'est montré légèrement plus élevé en Colombie-Britannique qu'au Québec, ce qui peut s'expliquer par un certain niveau de plasticité de croissance de l'épinette noire ou par les dissemblances climatiques ou géographiques que l'on observe entre les deux régions.

L'application des modèles de croissance internodale nécessite des arbres-échantillons dont la croissance en hauteur reflète le potentiel de la station (B.C. Ministry of Forests 1995). Le processus de sélection de ces arbres peut, dans certains cas, être compliqué par le fait que le sapin baumier et l'épinette noire peuvent résister à de longues périodes de ralentissement de croissance (Crossley 1976) et sont vulnérables aux épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (Sanders *et al.* 1985). Selon Monserud (1985), les arbres ayant subi un épisode de ralentissement de croissance ou de défoliation, ou ayant une cime endommagée, ne devraient pas être sélectionnés pour caractériser une station car ils peuvent entraîner une sous-estimation de l'indice de qualité de station. Le rejet systématique des arbres ayant un ralentissement de croissance juvénile peut toutefois devenir un obstacle important dans la détermination adéquate de l'indice de qualité de station puisque dans certaines régions, plusieurs placettes seraient rejetées. Une solution de rechange consisterait à substituer une période équivalente de croissance jugée normale aux années de ralentissement de croissance (Seymour et Fajvan 2001). Grâce à cette méthode, un «âge ajusté» excluant les années de ralentissement de croissance pourrait être déterminé et servir à calculer un indice de qualité de station plus réaliste.

Bien qu'utiles pour l'estimation de l'indice de qualité de station des jeunes peuplements, les modèles de croissance internodale mis au point dans cette étude ne sont pas directement compatibles avec les équations d'indice de qualité de station actuellement employées au Québec (Pothier et Savard 1998) pour prévoir la croissance et la productivité des forêts. Ces dernières se fondent sur des données de placettes-échantillons temporaires et produisent des courbes plus asymptotiques que celles provenant d'arbres dominants pris séparément (Raulier *et al.* 2003). Le passage des modèles de croissance internodale aux modèles mettant en relation la hauteur et l'âge peut entraîner une hausse de la valeur de l'indice de qualité de station. Par conséquent, une équation de conversion<sup>3</sup> est nécessaire pour effectuer la transition entre les deux systèmes d'équations.

## Conclusion

Les modèles de croissance internodale pour l'épinette noire, le pin gris et le sapin baumier sont désormais disponibles et applicables pour l'ensemble du Québec. Les principaux écosystèmes forestiers où se retrouvent ces trois essences ont été couverts par l'échantillonnage réalisé dans cette étude.

<sup>3</sup>D. Mailly et M. Gaudreault. Application des modèles de croissance internodale pour les principales essences résineuses du Québec. Note de recherche forestière, Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Québec. En préparation.

De plus, les modèles sont disponibles à deux hauteurs de référence pour la détermination de l'âge (1,0 m et 1,3 m), de telle sorte qu'ils peuvent être testés et employés non seulement au Québec, mais aussi dans d'autres régions comme par exemple dans l'Est du Canada. La validation des modèles a révélé une faible erreur d'estimation moyenne pour les trois essences; cette erreur n'occasionne donc pas d'inconvénients pratiques majeurs. D'autres données devront toutefois être recueillies pour effectuer une validation plus complète des modèles.

## Remerciements

Nous tenons à remercier tout particulièrement Gordon Nigh, de la Direction de la recherche du ministère des Forêts de la Colombie-Britannique, pour ses conseils statistiques et pour ses nombreux commentaires pertinents sur tous les aspects de cette étude. Nos remerciements s'adressent également au personnel du ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec, de plusieurs régions de la province, pour l'aide apportée lors de la localisation des peuplements forestiers nécessaires à cette étude. Nous remercions aussi Hervé Lortie, Johanne Claveau, Guy Brousseau, Carl Lemieux, Pierre Grondin, Stéphane Tremblay, Jean-Pierre Saucier, Philippe Racine et Claude Gagné pour leur assistance dans la collecte des données; Jolène Lemieux, Sylvain Turbis, Jean Noël et Denis Hotte pour leur aide dans la gestion des bases de données; ainsi que Patrice Tardif, Louis Blais et Isabelle Auger pour leur appui au niveau des analyses statistiques. Les observations de Peter Marshall de la Faculté de foresterie de l'Université de la Colombie-Britannique, de Stéphane Tremblay de la Direction de la recherche forestière (Forêt Québec) et celles d'un réviseur anonyme ont contribué à l'amélioration du manuscrit. Cette étude a été financée par la Direction de la recherche forestière (Forêt Québec) dans le cadre des projets 311-1620 et 311-3065.

## Références

- Bates, D.M. et D.G. Watts. 1980. Relative curvature measures of nonlinearity. *J. R. Statist. Soc.* 42(Ser. B;1): 1–25.
- B.C. Ministry of Forests. 1995. Growth intercept method for silviculture surveys. Silviculture Practices Branch, Ministry of Forests, Victoria, B.C.
- Boudoux, M. 1978. Empirical Yield tables for Black spruce, Balsam fir and Jack pine in Quebec. Ministère des Terres et Forêts, Québec.
- Brokaw, N. et J. Thompson. 2000. The H for DBH. *For. Ecol. Manage.* 129: 89–91.
- Box, M.J. 1971. Bias in nonlinear estimation. *J. R. Statist. Soc.* 33(Ser. B;1): 171–201.
- Crossley, D.I. 1976. Growth response of spruce and fir to release from suppression. *For. Chron.* 52: 189–193.
- Endrenyi, L. et F.H.F. Kwong. 1981. Tests for the behaviour of experimental errors. In L. Endrenyi (ed.). *Kinetic data analysis*. Plenum Press, New York.
- Fekedulegn, F., M.P. Mac Siurtain et J.J. Colbert. 1999. Parameter estimation of nonlinear growth models in forestry. *Silva Fennica* 33(4): 327–336.
- Guay, R., R. Gagnon et H. Morin. 1992. A new automatic and interactive tree ring measurement system based on a line scan camera. *For. Chron.* 68: 138–141.
- Holmes, R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69–78.

- Ministère des Ressources naturelles du Québec. 2000.** Normes de vérification du sondage en forêt : placettes-échantillons permanentes, placettes-échantillons temporaires, point d'observation écologique. Direction des inventaires forestiers, Forêt Québec.
- Ministère des Ressources naturelles du Québec. 2001.** Normes d'inventaire forestier: les placettes-échantillons permanentes. Direction des inventaires forestiers, Forêt Québec.
- Monserud, R.A. 1985.** Applying height growth and site index curves for inland Douglas-fir. USDA For. Serv. Res. Pap. INT-347.
- Nigh, G.D. 1995.** Variable growth intercept models for lodgepole pine in the sub-boreal spruce biogeoclimatic zone, British Columbia. Ministry of Forests, Victoria, B.C. Research Report RR-02.
- Nigh, G.D. 1996.** A variable growth intercept model for spruce in the Sub-Boreal spruce and Engelmann Spruce-Subalpine Fir biogeoclimatic zones of British Columbia. Ministry of Forests, Victoria, B.C. Research Report RR-05.
- Nigh, G.D. 1997a.** A growth intercept model for coastal Douglas fir. Ministry of Forests, Victoria, B.C. Research Report RR-10.
- Nigh, G.D. 1997b.** Revised growth intercept models for lodgepole pine: comparing northern and southern models. B.C. Min. For., Res. Br., Victoria, B.C. Exten. Note 11.
- Nigh, G.D. 1997c.** Interior Douglas-fir growth intercept models. Ministry of Forests, Res. Br., Victoria, B.C. Exten. Note 12.
- Nigh, G.D. 1998.** A system for estimating height and site index of western hemlock in the interior of British Columbia. For. Chron. 74: 588-96.
- Nigh, G.D. 1999.** Revised growth intercept model for coastal western hemlock, Sitka spruce, and interior spruce. Min. For., Res. Br., Victoria, B.C. Exten. Note 37.
- Nigh, G.D. 2000.** Western Redcedar Site Index Models for the Interior of British Columbia. Ministry of Forests, Victoria, B.C. Research Report RR-18.
- Nigh, G.D. 2002.** Growth Intercept, Years-to-Breast-Height, and Juvenile Height Growth models for Ponderosa Pine. Min. For., Res. Br., Victoria, B.C., Tech. Rep. 2.
- Nigh, G.D. 2004.** Growth intercept and site series-based estimates of site index for white spruce in the Boreal White and Black Spruce biogeoclimatic zone. Res. Br., Min. For., Victoria, B.C. Tech. Rep. 13.
- Nigh, G.D., D. Brisco et D. New. 1999.** Growth intercept models for western larch. Min. For., Res. Br., Victoria, B.C., Exten. Note 38.
- Nigh, G.D. et K. Klinka. 2001.** Growth intercept models for black spruce. Min. For., Res. Br., Victoria, B.C., Exten. Note 57.
- Nigh, G.D., P.V. Krestov et K. Klinka. 2002.** Height growth of black spruce in British Columbia. For. Chron. 78: 306-313.
- Nigh, G.D. et P.J. Martin. 2001.** A method to assess the performance of growth intercept models in British Columbia. For. Chron. 77: 491-499.
- Pothier, D. et F. Savard. 1998.** Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Forêt Québec. Québec.
- Ratkowski, D.A. 1983.** Nonlinear regression modelling, 1<sup>st</sup> ed., Marcel Dekker, Inc. New York.
- Raulier, F., M.-C. Lambert, D. Pothier et C.-H. Ung. 2003.** Impact of dominant tree dynamics on site index curves. For. Ecol. Manage. 184: 65-78.
- Sanders, C.J., R.W. Stark, E.J. Mullins et J. Murphy, eds. 1985.** Recent advances in spruce budworm, research. Proceedings, CANUSA spruce budworms research symposium, Bangor, ME, Sept. 16-20. Canadian Forestry Service, Ottawa, ON.
- SAS Institute Inc. 1999.** SAS/STAT<sup>TM</sup> User's Guide: version 8.1. SAS Institute Inc. Cary, NC.
- Saucier, J.-P., J.-F. Bergeron, P. Grondin et A. Robitaille. 1998.** Les régions écologiques du Québec méridional (3e version). L'Aubelle 124, Supplément.
- Sen, A.K. et M. Srivastava. 1990.** Regression analysis: theory, methods, and applications. Springer-Verlag, New York.
- Seymour, R. et M.A. Fajvan. 2001.** Influence of prior growth suppression and soil on red spruce site index. North. J. Appl. For. 18: 55-62.
- Shapiro, S.S. et M.B. Wilk. 1965.** An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika 52(3,4): 591-611.
- Tardif, P. 2001.** ANATI (Win32/ Matlab R 11.3, v 2.2) [Software]. Direction de la recherche forestière, Ministère des Ressources naturelles du Québec, Sainte-Foy, Québec.
- Thrower, J.S. 1987.** Growth intercepts for estimating site quality of young white spruce plantations in north central Ontario. Can. J. For. Res. 17: 1385-1389.
- Vézina, P.-E. et A. Linteau, 1968.** Growth and yield of balsam fir and black spruce in Quebec. Department of Forestry and Rural Development Canada, Forestry Branch, Information Report Q-X-2.