

Modèle de croissance pour les plantations de mélèzes

Dominique Pauwels, Philippe Lejeune, Jacques Rondeux

Unité de Gestion et Économie forestières. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique). E-mail : lejeune.p@fsagx.ac.be

Reçu le 8 janvier 2003, accepté le 23 mai 2003.

Un modèle de croissance en grosseur (circonférence) de type arbre indépendant des distances a été construit pour les peuplements purs et équiennes de mélèze (*Larix sp.*) croissant en Région wallonne. Ce modèle s'appuie sur un échantillon de 2578 mélèzes (mélèzes du Japon, d'Europe et hybride) issus de 99 peuplements. Il permet de prédire l'accroissement en circonférence des arbres à partir de leur circonférence, de la hauteur dominante, de la surface terrière, de l'âge et de l'indice de productivité des peuplements. Ce modèle a été validé en estimant l'accroissement annuel des circonférences, à 1,3 m au-dessus du niveau du sol, de 1283 mélèzes mesurés dans 48 peuplements indépendants de ceux ayant servi à construire le modèle. Le modèle permet une estimation non biaisée de l'accroissement (erreur moyenne = -0,002 cm avec un écart-type de 0,60 cm). L'erreur moyenne absolue des estimations est de 0,46 cm·an⁻¹. Le modèle a également été testé pour prédire l'accroissement de mélèzes issus de dispositifs expérimentaux français présentant des traitements sylvicoles très contrastés. Les résidus de ces estimations dépendent de la surface terrière du peuplement et sont d'autant plus élevés que celle-ci est faible. Un facteur de correction, lié à la surface terrière par l'intermédiaire d'une courbe de Bailey et Clutter, a été introduit pour étendre le domaine de validité du modèle aux peuplements dont la surface terrière est inférieure à 12 m²·ha⁻¹. Ce facteur n'affecte pas les estimations des accroissements lorsque les caractéristiques du peuplement correspondent à celles de l'échantillon utilisé pour construire le modèle (facteur de correction proche de 1). L'intérêt d'introduire dans le modèle des indices de compétition dépendant des distances ou des variables qualitatives stationnelles a également été évalué. Aucune de ces variables indépendantes ne permet d'améliorer significativement le modèle de croissance déterminé.

Mots-clés. *Larix*, mélèze, modèle de croissance, grosseur, Belgique.

Growth model for larch in pure and even-aged stands. A distance independent tree growth model has been determined for pure and even-aged larch stands (*Larix sp.*) growing in Walloon Region (South Belgium). This model has been built from 2578 larches (Japanese, European and Hybrid larches) in 99 stands. It enables to predict tree circumference increment from circumference, dominant height, basal area, age and site index of stands. Estimating increments of 1283 larches in 48 stands has been used to validate the model that gives unbiased estimates of the increments (mean error = -0.002 cm with standard deviation of 0.60 cm). The mean absolute error of estimates is 0.46 cm·year⁻¹. The model has also been tested to predict the increment of larches in French experimental plots having very different silvicultural treatments. The residues of these estimations depend on the stand basal area: the lesser the stand basal area, the higher the residues of the estimation. A correction factor, linked to basal area through a Bailey and Clutter curve, has been introduced to extend the validity of the model to stands with a basal area lower than 12 m²·ha⁻¹. This factor does not affect the increment estimations if the stand characteristics are close to mean value of the sample used to build the model (correction factor close to 1). The introduction in the model of competition indexes distance dependant or site qualitative variables does not significantly improve the growth model.

Keywords. *Larix*, larch, growth model, girth, Belgium.

1. INTRODUCTION

Le mélèze, représenté par trois espèces — le mélèze du Japon (*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.), le mélèze d'Europe (*Larix decidua* Mill.) et le mélèze hybride (*Larix eurolepis* Henry) —, figure avec l'épicéa (*Picea abies* (L.) Karst.), le douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) parmi les principales essences résineuses cultivées en

Région wallonne. Il reste cependant relativement marginal puisqu'il ne représente guère plus de 4 % des peuplements résineux (Lecomte *et al.*, 1997).

Il constitue toutefois une essence d'avenir pour la forêt wallonne. En particulier, dans le cadre d'une gestion durable des massifs forestiers, il permet de produire un bois de qualité aux multiples usages tout en rencontrant mieux que d'autres résineux des préoccupations d'ordre écologique, cynégétique et esthétique.

Le caractère multifonctionnel de cette essence ne peut cependant être pleinement valorisé qu'à la condition de lui appliquer un traitement sylvicole adéquat.

La définition d'un tel traitement peut notamment s'appuyer sur l'utilisation de modèles de croissance. Ceux-ci consistent à réduire une réalité complexe à un système structuré d'éléments et de relations (Bouchon, 1995) qui permettent d'estimer l'évolution probable du peuplement au cours du temps. Par l'utilisation de ces relations et l'application de contraintes définissant la nature et l'intensité des interventions, l'impact du traitement sylvicole peut ainsi être étudié.

Différents modèles sont nécessaires pour pouvoir simuler l'évolution d'un peuplement forestier au cours du temps. Les principaux concernent la croissance en hauteur dominante¹, qui détermine les niveaux de productivité et la croissance en grosseur qui dépend surtout des éclaircies. Un modèle de croissance en hauteur dominante a déjà été élaboré pour les mélèzes en Région wallonne (Pauwels *et al.*, 1999). Le présent article s'attache à décrire la construction du modèle de croissance en grosseur qui constitue le cœur des simulations portant sur l'impact du traitement sylvicole.

Le modèle qui est développé pour décrire la croissance en grosseur des mélèzes fonctionne au niveau "arbre". Contrairement aux modèles de type "peuplement", il permet de mieux décrire l'incidence de traitements s'écartant d'une sylviculture moyenne (Lejeune, 1994).

Au sein des modèles de type "arbre", on distingue

- les modèles dépendants des distances qui prennent en compte la répartition spatiale des arbres au travers d'indices de compétition et
- les modèles indépendants des distances qui font appel à des indices de densité globale pour lesquels on ne connaît que la liste des arbres, sans référence à leur localisation spatiale (Bouchon, 1995).

Ces derniers modèles sont généralement robustes, plus simples à mettre en œuvre et, présentant un large spectre d'application, ont été retenus pour développer le modèle de croissance en grosseur précité. Il est toutefois vérifié dans quelle mesure l'introduction d'indices de compétition basés sur les distances entre individus permet ou non d'améliorer significativement la précision du modèle.

Le modèle concerne l'estimation de l'accroissement annuel en circonférence des mélèzes et est construit à partir de l'information récoltée au sein de placettes semi-permanentes installées en Région wallonne.

¹ La hauteur dominante est la moyenne des hauteurs totales des *n* plus gros arbres repérés sur une unité d'échantillonnage de *n* ares, soit des 100 plus gros bois à l'hectare.

La méthodologie mise en œuvre (§ 2) et les données disponibles pour la construction du modèle (§ 3) sont d'abord présentées. Les résultats (§ 4) sont ensuite détaillés et discutés, un exemple d'application du modèle est traité (§ 5) avant de tirer quelques conclusions (§ 6).

2. MÉTHODE

Le modèle a pour objectif de relier la croissance individuelle de l'arbre aux facteurs capables d'influencer celui-ci.

À cette fin, les informations disponibles sont composées d'une part, de variables quantitatives relatives à l'arbre, à la compétition qu'il subit, au peuplement auquel il appartient et à la station et, d'autre part, de variables qualitatives concernant le milieu de croissance (**Tableau 1**). Malgré l'influence que les facteurs génétiques peuvent exercer sur la croissance des peuplements (Danjon, 1995), il n'a pas

Tableau 1. Variables disponibles pour l'ajustement du modèle de croissance individuelle en grosseur — *Variables to fit the tree girth growth model.*

Niveau Type	Variables
Arbre	
Dimension	Circonférence à 1,3 m
Concurrence	Indices de compétition ¹ dépendant des distances ²
Peuplement	
Caractéristiques	Âge, espèce, circonférence de l'arbre de surface terrière moyenne, circonférence et hauteur dominantes, indice de productivité
Concurrence	Indices de densité ³
Station	
Quantitatif	Altitude Climat : température et précipitations moyennes, durée de la période de végétation
Qualitatif	Sol : texture, profil, drainage, profondeur, nature et abondance de la charge caillouteuse Géomorphologie : relief, pente, exposition Régions naturelles et territoires écologiques

¹ Les indices de compétition tiennent compte des dimensions relatives des arbres voisins et éventuellement de leur distance et de leur orientation et rendent compte de la concurrence locale au voisinage immédiat de l'arbre.

² Pour un sous-échantillon.

³ Les indices de densité mesurent la pression de concurrence qui s'exerce dans le peuplement.

été possible de tenir compte de ces facteurs, excepté le facteur espèce, faute de pouvoir disposer d'informations de ce type.

Les indices de compétition dépendant des distances et les indices de densité sont rassemblés respectivement dans les **tableaux 2** et **3**. Le calcul des indices de compétition nécessite la détermination des compétiteurs de l'arbre pour lequel l'indice est calculé. Les compétiteurs sont définis par la méthode de l'angle critique de Bitterlich qui permet de sélectionner les compétiteurs sur la base d'une probabilité proportionnelle à leur surface terrière (Rondeux, 1999). La nécessité de connaître les caractéristiques de tous les compétiteurs de l'arbre considéré réduit considérablement le nombre d'arbres

Tableau 2. Indices de compétition dépendant des distances, calculés pour l'ajustement du modèle de croissance individuelle en grosseur — *Distance dependant competition indexes assessed for fitting tree girth growth model.*

Indice	Source
$HAM1 = \frac{n \frac{c130_c}{c130_s} 10^3}{\sum_{c=1}^{n-1} dist_c^2} 10^2$	Hamilton (1969)
$CI = \frac{n \frac{c130_c}{c130_s} 10^3}{\sum_{c=1}^{n-1} dist_c}$	Hegyí (1974)
$FABER = \frac{g_s n}{\sum_{c=1}^{n-1} g_c dist_c^2} 10^6$	Faber (1991)
$CS = \frac{g_s}{n} \frac{10^4}{\sum_{c=1}^{n-1} dist_c^2}$	
$A = \frac{n \frac{dist_c c130_s^2}{c130_s + c130_c} \frac{c130_c}{dist_c}}{\sum_{c=1}^{n-1} \frac{c130_c}{dist_c}} 10^4$	Alemdag (1978)
$ME = \frac{n \frac{c130_c}{c130_s} \exp \frac{dist_c}{c130_c + c130_s}}{\sum_{c=1}^{n-1} \frac{c130_c}{c130_s}}$	Martin <i>et al.</i> (1977)
$Cd = \frac{n \frac{c130_c^3}{dist_c c130_s} 10^2}{\sum_{c=1}^{n-1} \frac{c130_c^3}{dist_c c130_s}}$	Nystorm, Gemmel (1988)

c = indice relatif aux compétiteurs ; s = indice relatif au sujet (arbre pour lequel l'indice est calculé) ; c130 = circonférence à 1,3 m (cm) ; dist_c = distance entre le compétiteur c et le sujet s (cm) ; n = nombre de compétiteurs ; g = surface terrière de l'arbre (cm²).

utilisables au sein de chaque placette car les indices de compétition ne peuvent être calculés pour les arbres situés en bordure de placette ou proches de celle-ci.

D'autres caractéristiques auraient également pu être utilisées pour tenter d'expliquer la croissance des arbres. De nombreux auteurs (Krajicek *et al.*, 1961 ; Wykoff, 1990 ; Hasenauer, Monserud, 1996) considèrent en effet la partie vivante du houppier comme un bon indicateur de la vigueur d'un arbre et l'utilisent dans les modèles pour décrire la croissance potentielle. L'importance du houppier (hauteur de cime/hauteur totale) traduit de manière indirecte le traitement sylvicole antérieur subi par l'arbre. En effet, les peuplements ayant été maintenus très serrés présentent des sujets dont le houppier est peu développé et étriqué, à l'inverse des arbres ayant davantage une forme "spécifique" au sein de peuplements fortement éclaircis. Cette variable n'a cependant pas été prise en considération, essentiellement pour deux raisons. D'une part, cette information n'est disponible que

Tableau 3. Indices de densité calculés pour l'ajustement du modèle de croissance individuelle en grosseur (Lejeune, 1994) — *Density indexes assessed for fitting tree girth growth model (Lejeune, 1994).*

Indice	
$Gha = \frac{10^4}{Surf} \sum_{s=1}^n g_s$	$Nha = \frac{10^4}{Surf} n$
$creldom_s = \frac{c130_s}{Cdom}$	$crel_s = \frac{c130_s}{Cg}$
$VAR = \frac{\sum_{s=1}^n c130_s^2 - \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n c130_s^2}{n-1}$	$VARREL = \frac{VAR}{Cg}$
$EPG_s = \frac{c130_s^2}{4 * Gha}$	$DR = \frac{Gha}{\sqrt{Cg}}$
$Gsup_s = \frac{\sum_{c=1}^n g_c f_c}{Surf} 10^4$	avec $f_c = 1$ si $g_c > g_s$ $f_c = 0$ si $g_c \leq g_s$
$Gsuprel_s = \frac{Gsup_s}{Gha}$	

c = indice relatif aux compétiteurs ; s = indice relatif au sujet (arbre pour lequel l'indice est calculé) ; c130_s = circonférence à 1,3 m de l'arbre s (cm) ; n = nombre d'arbres présents dans l'unité d'échantillonnage ; g_s = surface terrière de l'arbre s (cm²) ; Cdom = circonférence dominante (cm) ; Cg = circonférence de l'arbre de surface terrière moyenne (cm) ; Surf = surface de la placette (m²).

pour un nombre limité d'arbres dans l'échantillon et d'autre part, son utilisation dans le modèle nécessite la détermination d'une relation permettant de décrire l'évolution du houppier en fonction du temps et de la sylviculture pratiquée. Cette relation n'a pu être définie faute de données récoltées sur l'évolution passée de ces caractéristiques.

Ayant déterminé l'ensemble de l'information utilisable, nous recherchons, à l'aide d'une procédure de sélection pas à pas des variables (STEPWISE), les variables quantitatives entrant dans les régressions linéaires multiples qui permettent d'expliquer au mieux l'accroissement moyen courant en circonférence observé (§ 4.1). Cette étape ne tient pas compte des indices de compétition car ceux-ci ne peuvent être calculés pour l'ensemble des arbres de l'échantillon.

Les ajustements sont effectués pour l'ensemble des espèces (modèle global) et pour chaque espèce séparément. La qualité des ajustements est évaluée par le coefficient de détermination R^2 , l'écart-type résiduel et par l'analyse visuelle des résidus (différence entre les valeurs observées et les valeurs estimées d'accroissement) destinée à apprécier les éventuels biais.

Les modèles sont alors testés pour validation sur un jeu de données indépendant de celui ayant servi à les construire (§ 4.2).

Nous évaluons ensuite dans quelle mesure les indices de compétition peuvent significativement augmenter la précision du modèle en étudiant les corrélations entre ces indices et les résidus du modèle (§ 4.3).

Finalement, nous recherchons les variables qualitatives stationnelles qui pourraient influencer la croissance des mélèzes (§ 4.4) à l'aide d'analyses de la variance à un critère de classification appliquées aux résidus moyens calculés pour chaque peuplement. Ces analyses sont effectuées sur les résidus moyens et non sur les accroissements moyens observés afin de s'affranchir de l'influence de la sylviculture sur l'accroissement et de pouvoir ainsi mieux isoler l'effet réel des facteurs du milieu.

3. MATÉRIEL

La croissance des peuplements de mélèzes est mesurée dans des placettes semi-permanentes installées en Région wallonne et remesurées tous les 3 ou 4 ans.

Outre la bonne représentativité de la diversité des conditions de croissance, l'échantillon sur lequel nous appuyons nos mesures et observations porte sur des peuplements de mélèze qui répondent aux critères suivants

- purs ou quasi-purs (surface terrière de mélèze égale ou supérieure à 95 %) ;
- équiennes ;

- homogènes sur leur étendue, sans vides ni trouées ;
- d'étendue suffisante de manière à éviter les effets de bordure.

Les placettes semi-permanentes sont de forme circulaire, leur étendue variant de 2 ares à 25 ares, de manière à comporter par convention au moins 25 bois mesurables.

Les peuplements échantillonnés, aussi bien en forêts publiques que privées, concernent principalement le mélèze du Japon. Dans la mesure du possible, des peuplements de mélèze d'Europe et de mélèzes hybrides ont également été inventoriés de manière à comparer la croissance de ces différentes espèces.

Seuls les peuplements non éclaircis entre les deux mesurages ont été sélectionnés pour cette étude. L'élaboration des modèles de croissance se base sur l'analyse d'un total de 147 placettes (95 de mélèze du Japon, 35 de mélèze d'Europe et 17 de mélèzes hybrides). Environ un tiers de celles-ci, tirées au hasard, sont utilisées pour la phase de validation des modèles.

La **figure 1** présente la localisation des placettes ayant servi à construire et à valider les modèles. Le **tableau 4** reprend les caractéristiques des arbres et des peuplements concernés.

La densité des peuplements inventoriés fait l'objet de la **figure 2** qui reprend, pour les différentes espèces de mélèze, les surfaces terrières en fonction de l'âge.

En plus de ces données, nous disposons de mesures d'accroissement effectuées, sur des périodes de 3 ans, dans 10 dispositifs d'éclaircie installés en France (Haute-Vienne, Corrèze, Alpes du Sud, Haut-Rhin, Perche, Massif Central, Normandie) par le CEMAGREF de Clermont-Ferrand et par l'INRA d'Orléans. Les conditions de croissance de ces peuplements ne sont certes pas strictement identiques à celles observées en Région wallonne (altitude, climat...). Toutefois,

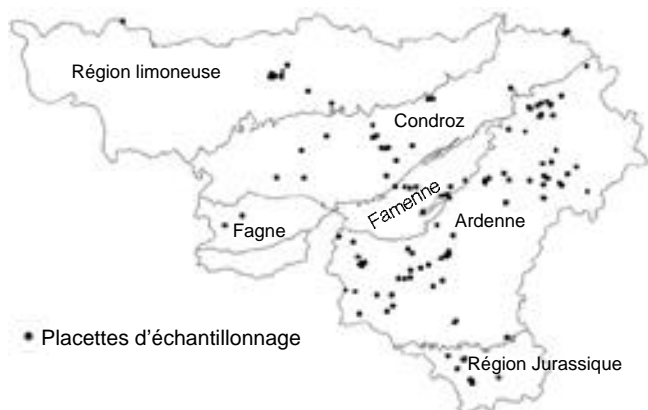
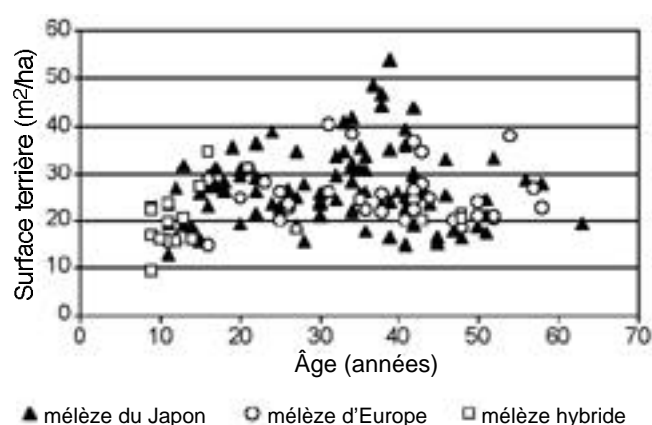


Figure 1. Localisation des placettes de mélèzes utilisées pour la construction et la validation du modèle de croissance en gousseur — *Location of larch plots used to build and validate the girth growth model.*

Tableau 4. Caractéristiques des arbres et des peuplements utilisés pour construire et valider les modèles de croissance en grosseur (* le calcul de l'accroissement annuel courant est basé sur une période de 3 ou 4 ans) — *Characteristics of trees and stands used to build and validate the girth growth model (*the annual increment is calculated for a period off 3 or 4 years).*

	Placettes "construction"				Placettes "Validation"			
	Moy	Min	Max	CV (%)	Moy	Min	Max	CV(%)
Mélèze du Japon	63 placettes – 1624 arbres				32 placettes – 858 arbres			
Âge (années)	30,2	11	63	42,1	32,2	13	51	30,6
c130 (cm)	75	13	171	37,5	76	23	180	30,7
Accroissement annuel								
courant en c130 (cm·an ⁻¹)*	1,73	0	5,7	52,8	1,43	0	3,7	52,4
Circonférence moyenne (cm)	75,9	30,2	144,4	33,9	76,5	39,7	133,4	25,1
Hauteur dominante (m)	21,1	9,6	31,7	26,8	22,0	11,6	29,9	19,8
Densité (tiges·ha ⁻¹)	840	113	3700	80,4	828	133	2500	71,4
Surface terrière (m ² ·ha ⁻¹)	26,7	12,6	48,1	29,1	29,5	16,5	53,6	26,9
Mélèze d'Europe	25 placettes – 644 arbres				10 placettes – 235 arbres			
Âge (années)	36,4	11	58	34,5	37,8	16	54	32,3
c130 (cm)	82	15	164	35,5	86	24	183	29,5
Accroissement annuel								
courant en c130 (cm·an ⁻¹)*	1,59	0	4,3	50,3	1,66	0	4,3	44,6
Circonférence moyenne (cm)	83,6	31,0	128,2	30,8	86,9	61,3	122,5	22,2
Hauteur dominante (m)	22,5	10,1	29,8	23,3	23,8	14,4	29,2	21,8
Densité (tiges·ha ⁻¹)	650	173	2013	79,2	525	176	1033	54,3
Surface terrière (m ² ·ha ⁻¹)	25,2	14,8	40,2	25,2	26,3	18,4	37,9	21,1
Mélèze hybride	11 placettes – 310 arbres				6 placettes – 190 arbres			
Âge (années)	15,7	9	48	72,5	15,9	9	43	65,1
c130 (cm)	46	8	155	58,8	56	10	192	67,5
Accroissement annuel								
courant en c130 (cm·an ⁻¹)*	2,60	0	7,7	56,9	2,08	0	4,5	43,8
Circonférence moyenne (cm)	46,6	28,4	132,5	53,4	55,3	33,2	143,9	59,7
Hauteur dominante (m)	13,4	9,5	31,6	45,2	14,9	10,3	27,3	35,6
Densité (tiges·ha ⁻¹)	1544	147	2485	49,0	1445	123	2050	42,1
Surface terrière (m ² ·ha ⁻¹)	18,6	9,3	34,3	29,1	23,0	15,8	30,9	20,5

**Figure 2.** Surfaces terrières en fonction de l'âge dans les peuplements de mélèzes inventoriés (placettes "construction" et "validation") — *Basal area versus age of sampled larch stands (plots for building and validation).*

l'intérêt de ces dispositifs réside dans la gamme des intensités d'éclaircie (très fortes) absente du jeu de données belges. Les dispositifs français apparaissent donc particulièrement utiles pour tenter de délimiter le domaine de validité du modèle de croissance. Les caractéristiques de ces dispositifs sont décrites dans le **tableau 5**.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1. Modèle de croissance en grosseur

Les variables entrant dans le modèle de croissance en grosseur, sont :

- la surface terrière du peuplement (Gha, en m²·ha⁻¹),
- le rapport (Hdom/c130) entre la hauteur dominante du peuplement (Hdom, en m) et la circonférence de l'arbre à 1,3 m (c130, en cm),
- l'indice de productivité du peuplement (H50, en m),
- l'âge du peuplement (âge, en années).

Tableau 5. Caractéristiques des dispositifs français utilisés pour valider les modèles de croissance en grosseur — *Characteristics of French experimental trials used to validate the girth growth model.*

Dispositif	Altitude (m)	Espèce	Âge (ans)	Modalité d'ex-périmentation	N	Gha (m ² .ha ⁻¹)	Accroissement annuel (cm) (min-max)
Lafeyre (Haute-Vienne)	460	Japon	38	1	28	16,4	1,7 (0,7 - 2,3)
				2	37	21,7	1,4 (0,3 - 3,3)
Graffeuille (Corrèze)	555	Japon	34	1	100	28,8	0,9 (0 - 1,7)
				2	43	16,3	1,3 (0,3 - 2)
Les Agriers (Corrèze)	880	Japon	17	1	377	11,7	2,3 (0,25 - 4,75)
				2	213	8,2	2,9 (0,75 - 4,75)
				3	114	3,9	3,3 (1,5 - 5,5)
Labouret (Alpes du Sud)	1000	Europe	30	1	79	25,4	1,2 (0,1 - 3,5)
				2	149	23,8	1,1 (0,1 - 3,5)
				3	83	18,1	1,8 (0,8 - 3)
Verdon (Alpes du Sud)	1000	Europe	78	1	90	42,1	0,9 (0,3 - 1,7)
				2	90	29,4	1,2 (0,5 - 2,7)
				3	90	20,3	1,2 (0,3 - 2,2)
Peyrat-le-Château (Haute-Vienne)	460	Hybride	8	1	279	22,6	2,9 (0 - 6,25)
				2	587	10,5	4,6 (0 - 9,25)
Massevaux (Haut-Rhin)	525	Hybride	12	1	240	23,4	1,8 (0 - 4,7)
				2	135	17,8	2,9 (0,7 - 4,7)
Sille-le-Guillaume (Perche)	200	Hybride	11	1	96	11,2	2,7 (1,2 - 5,5)
				2	104	6,1	3,5 (0,4 - 5,1)
				3	125	4,5	4,7 (1,2 - 7,4)
				4	144	3,7	5,4 (0,4 - 7,6)
				5	129	2,2	5,4 (3 - 7,7)
Laqueuille (Massif Central)	1250	Hybride	5	1	54	1,3	3,8 (0,7 - 5,2)
Sainte Geneviève en Bray (Normandie)	129	Hybride	10	1	164	28,3	2,6 (0 - 6,7)
				2	219	17,6	3,6 (0 - 13,6)
				3	228	10,0	5,6 (0,1 - 10,6)
				4	259	5,18	5,9 (0 - 10,3)

La surface terrière mesure la pression de concurrence qui s'exerce dans le peuplement. Plus la surface terrière est élevée, moins l'accroissement individuel en grosseur est important, les autres caractéristiques étant égales. Cette seule variable permet d'expliquer environ 30 % de la variabilité de l'accroissement en circonférence.

La part de la variabilité observée, expliquée par le rapport entre la hauteur dominante et la circonférence, est de l'ordre de 26 %. L'accroissement est d'autant plus élevé que ce rapport, qui traduit d'une certaine manière le statut social de l'arbre, est faible.

L'apport des 2 dernières variables, l'indice de productivité et l'âge, est plus limité. Celles-ci

expliquent respectivement environ 3 % et 1 % de la variabilité observée. Elles traduisent d'une part l'augmentation de la croissance avec la productivité de la station vis-à-vis de l'espèce considérée et d'autre part l'importance de l'accroissement dans les jeunes peuplements.

Aucune autre variable testée ne permet d'améliorer significativement le modèle. Les variables les plus corrélées aux résidus (VAR et EPG (**Tableau 3**)) expliquent moins de 1 % de la variance observée. Elles n'ont donc pas été introduites dans le modèle.

Les variables quantitatives relatives à la station (altitude, température, précipitations et durée de la période de végétation) ne sont pas corrélées aux

résidus du modèle ; le coefficient de corrélation le plus élevé étant, en valeur absolue, de 0,05.

Le **tableau 6** rassemble les équations des modèles de croissance en circonférence à 1,3 m (acc_c130 , en cm) déterminées pour l'ensemble des espèces (modèle général) et pour chaque espèce en particulier. Il présente également le coefficient de détermination (R^2 , en %), l'écart-type résiduel (σ_{res} , en cm) ainsi que les valeurs minimales et maximales des résidus.

En raison de son mode de construction, le modèle peut prédire des accroissements négatifs, ceux-ci sont alors remplacés par des valeurs nulles lors de l'utilisation du modèle.

Tableau 6. Équations des modèles de croissance en grosseur pour les mélèzes — *Larch tree girth growth models*.

Modèle	R^2	σ_{res}	Résidus min max
général			
$acc_c130 = 6,1048 + \frac{33,325}{Gha} - 1,92103 \ln \frac{Hdom}{c130} 100$ $+ 0,00046251 H50^2 + \frac{6,9526}{Age}$			
	60,5	0,64	-2,0 - 3,0
particulier au mélèze du Japon			
$acc_c130 = 6,7014 + \frac{26,596}{Gha} - 1,92839 \ln \frac{Hdom}{c130} 100$ $+ \frac{10,7685}{Age}$			
	54,9	0,62	-1,91 - 2,51
particulier au mélèze d'Europe			
$acc_c130 = 4,6447 + \frac{39,209}{Gha} - 1,40488 \ln \frac{Hdom}{c130} 100$			
	49,6	0,57	-1,92 - 1,90
particulier au mélèze hybride			
$acc_c130 = 6,5552 + \frac{47,108}{Gha} - 2,3558 \ln \frac{Hdom}{c130} 100$ $+ 0,0012732 H50^2$			
	72,5	0,77	-1,87 - 2,43

Gha = surface terrière du peuplement — *stand basal area* (m^2/ha) ; $Hdom$ = hauteur dominante du peuplement — *dominant height* (m) ; $c130$ = circonférence de l'arbre à 1,3 m — *tree girth at 1.3 m* (cm) ; $H50$ = indice de productivité — *site index* (m) ; Age = âge du peuplement (années) — *stand age* (years) ; acc_c130 = croissance en circonférence à 1,3 m — *tree girth growth* (cm).

4.2. Validation du modèle

Validation sur les données wallonnes. Les modèles ont été utilisés pour estimer la croissance des arbres des placettes destinées à la phase de validation. Le **tableau 7** fournit les résidus résultant de ces estimations. Les chiffres entre parenthèses correspondent aux résidus calculés lorsque les estimations négatives de l'accroissement sont remplacées par une valeur nulle. Cette manière de procéder n'influence que très faiblement la valeur des résidus puisqu'elle ne concerne qu'un nombre très restreint d'arbres.

Quelle que soit l'espèce considérée, le modèle général présente des performances équivalentes à celles des modèles particuliers. Même s'il affiche un coefficient de détermination (R^2) légèrement plus faible pour les mélèzes d'Europe et hybride, nous le préférons aux modèles particuliers du fait de son champ d'application plus large.

Validation sur les données françaises. Le modèle général est testé ensuite sur les données des dispositifs français afin d'évaluer son comportement dans le cas de peuplements à très faibles surfaces terrières. L'élargissement du champ d'application du modèle permet en effet d'augmenter les possibilités de simulations.

Les caractéristiques des résidus calculés en remplaçant les estimations négatives par des accroissements nuls sont rassemblées dans le **tableau 8**. Nous constatons qu'ils sont élevés et ce, d'autant plus que la surface terrière du peuplement est faible, comme l'illustre la **figure 3**.

Afin d'étendre le domaine de validité du modèle à des peuplements de faibles surfaces terrières, nous définissons un facteur correctif ($fact_corr$) dont la valeur tend vers 1 pour des valeurs de surface terrière proches de celles observées dans les placettes ayant servi à construire le modèle.

$$fact_corr = 1 + \frac{accroissement\ observé - accroissement\ estimé}{accroissement\ estimé}$$

La relation entre ce facteur correctif et la surface terrière du peuplement est définie par ajustement non linéaire. Une courbe est ajustée aux valeurs moyennes des facteurs correctifs calculés pour les arbres des dispositifs et pour les arbres ayant servi à construire le modèle. Les données utilisées sont limitées aux peuplements présentant des surfaces terrières inférieures à 30 $m^2 \cdot ha^{-1}$ et ce, afin de pouvoir disposer d'un nombre suffisant d'observations (minimum 15 peuplements) par catégorie de surface terrière de 5 $m^2 \cdot ha^{-1}$. Les facteurs correctifs des estimations négatives sont fixés arbitrairement à 1, l'accroissement estimé est remplacé par la valeur nulle. Deux courbes ont été testées : celle de

Tableau 7. Caractéristiques des résidus et coefficient de détermination (R^2) de l'estimation de l'accroissement en circonférence des arbres des placettes installées en Région wallonne et conservées pour la validation (valeurs entre parenthèses : résidus calculés lorsque les estimations négatives sont remplacées par des accroissements nuls) — *Characteristics of the residues and determination coefficient of tree girth increment estimations in plots set up in Walloon Region and kept for validation (values between brackets : residues assessed when negative estimations are replaced by null increments).*

	Mélèze du Japon		Mélèze d'Europe		Mélèze hybride		Tous
	Modèle général	particulier	Modèle général	particulier	Modèle général	particulier	
Nombre d'observations	858		235		190		1283
Résidu moyen	-0,017 (-0,022)	-0,07*** (-0,07***)	0,072 (0,069)	0,16*** (0,15***)	0,12* (-0,12*)	-0,12 (-0,12)	-0,002 (-0,007)
Écart-type résiduel	0,55 (0,54)	0,56 (0,55)	0,57 (0,57)	0,56 (0,56)	0,72 (0,72)	0,68 (0,68)	0,6 (0,59)
Erreur absolue moyenne	0,44 (0,43)	0,45 (0,44)	0,44 (0,43)	0,44 (0,43)	0,56 (0,56)	0,55 (0,55)	0,46 (0,46)
R^2	49,1 (49,2)	46,5 (46,6)	41,1 (41,3)	43,4 (43,6)	38,3 (38,3)	46,0 (46,0)	47,6 (47,6)

*** = significatif au seuil = 0,001.

Tableau 8. Caractéristiques des résidus et coefficient de détermination (R^2) de l'estimation de l'accroissement en circonférence des arbres des dispositifs français — *Characteristics of residues and determination coefficient of tree girth increment estimations in French trials.*

	Mélèze du Japon	Mélèze d'Europe	Mélèze hybride
Nombre d'observations	912	581	2763
Résidu moyen	-1,71***	-0,26***	-1,59***
Écart-type résiduel	2,00	0,48	4,07
Erreur absolue moyenne	1,77	0,41	2,26
R^2	39,9	45,2	14,7

*** = significatif au seuil = 0,001.

Johnson-Schumacher (Debouche, 1977) et celle de Bailey et Clutter (Le Goff, 1982). Cette dernière a été retenue car elle présente le plus faible écart-type résiduel entre les valeurs observées et les valeurs estimées du facteur de correction. Son expression mathématique est la suivante :

$$fact_corr = \exp[0,059127 - 3,710101 \left(\frac{1}{Gha}\right)^{1,278959}]$$

et est illustrée dans la **figure 4**.

L'application du facteur correctif aux données des dispositifs français réduit considérablement les résidus principalement pour les mélèzes du Japon et hybride, présentant les densités les plus faibles (**Tableau 9** et **figure 5**).

Son application aux accroissements des arbres des peuplements belges choisis pour la validation du modèle influence très peu les résidus (**Tableau 10**) car le facteur est proche de la valeur 1 pour ces peuplements.

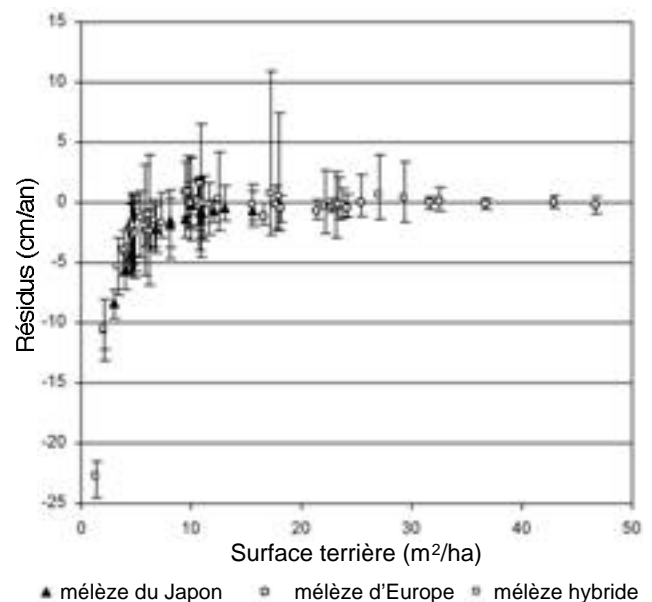


Figure 3. Résidus de l'estimation de l'accroissement en circonférence des arbres des dispositifs français en fonction de la surface terrière de la placette et de l'espèce — *Residues of tree girth increment estimation in French trials versus basal area and species.*

4.3. Utilité des indices de compétition pour l'amélioration du modèle de croissance

Afin d'évaluer dans quelle mesure les indices de compétition (indices dépendants des distances) permettent d'améliorer l'estimation des accroissements, les corrélations entre ces indices et les résidus du modèle général ont été calculées. Le **tableau 11** montre que les corrélations les plus importantes sont obtenues avec les indices HAM1 de Hamilton (1969), Ci de Hegyi (1974) et Cd de Nystrom et Gemmel

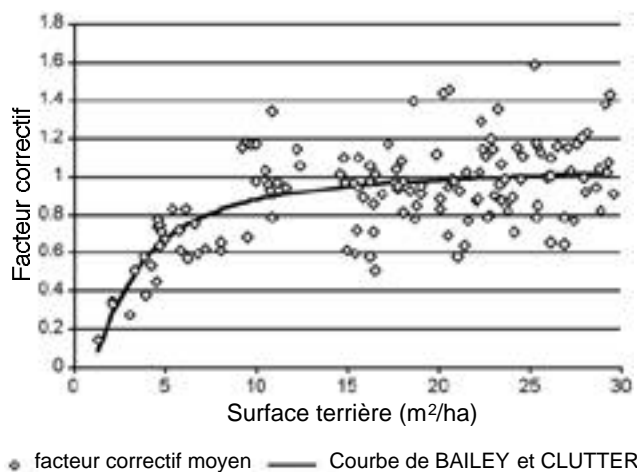


Figure 4. Relation entre le facteur correctif de l'estimation de l'accroissement en circonférence et la surface terrière du peuplement — *Relationship between correction factor to estimate girth increment and stand basal area.*

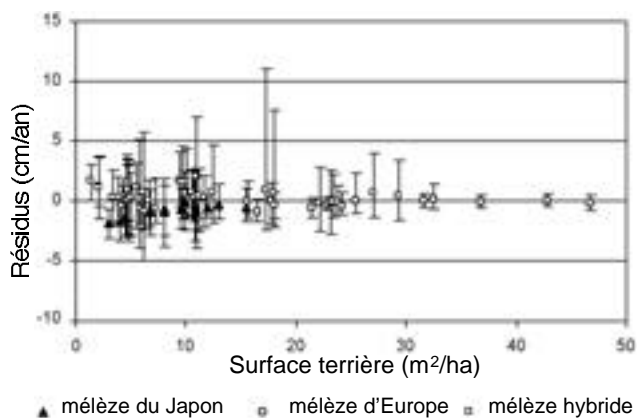


Figure 5. Résidus de l'estimation, en utilisant le facteur correctif estimé, de l'accroissement en circonférence des arbres des dispositifs français en fonction de la surface terrière de la placette et de l'espèce — *Residues of tree girth increment estimation with correction factor in French trials versus basal area and species.*

Tableau 9. Caractéristiques des résidus et coefficient de détermination (R^2) de l'estimation, en utilisant le facteur correctif estimé, de l'accroissement en circonférence des arbres des dispositifs français — *Characteristics of residues and determination coefficient of tree girth increment estimations with correction factor in French trials.*

	Mélèze du Japon	Mélèze d'Europe	Mélèze hybride
Nombre d'observations	912	581	2763
Résidu moyen	0,78***	-0,24***	-0,34***
Écart-type résiduel	0,80	0,47	1,31
Erreur absolue moyenne	0,91	0,40	1,02
R^2	54,9	46,0	53,9

*** = significatif au seuil = 0,001.

Tableau 10. Caractéristiques des résidus et coefficient de détermination (R^2) de l'estimation, en utilisant le facteur correctif estimé, de l'accroissement en circonférence des arbres des placettes installées en Région wallonne et conservées pour la validation — *Characteristics of the residues and determination coefficient of tree girth increment estimations with correction factor in plots set up in Walloon Region and kept for validation.*

	Mélèze du Japon	Mélèze d'Europe	Mélèze hybride	Tous
Nombre d'observations	858	235	190	1283
Facteur correctif min-max	0,96-1,04	0,97-1,02	0,95-1,01	0,95-1,04
Modèle général				
Résidu moyen	-0,02	0,08*	-0,08	-0,01
Écart-type résiduel	0,54	0,58	0,70	0,58
Erreur absolue moyenne	0,43	0,44	0,54	0,45
R^2	49,1	39,9	40,4	49,7

* = significatif au seuil = 0,05.

Tableau 11. Corrélations entre les indices de compétition dépendant des distances et les résidus du modèle général, les compétiteurs étant définis par la méthode de l'angle critique de Bitterlich — *Correlations between competition indexes distance dependent and residues of general model: the competitors have been determined using Bitterlich's method.*

	FST = 1	FST = 2	FST = 4	FST variable N = 3	FST variable N = 4
Nbre d'arbres	148	342	599	797	731
Nbre de placettes	17	54	66	66	66
HAM1	-0,164*	-0,085	-0,134***	-0,092	-0,094*
Ci	-0,145	-0,090	-0,152***	-0,115***	-0,118***
FABER	-0,034	0,089	0,036	-0,037	-0,004
CS	-0,222**	-0,156**	-0,046	0,016	0,003
A	0,040	-0,041	0,040	0,028	0,036
ME	0,056	0,051	-0,022	0,044	0,036
Cd	-0,200*	-0,116*	-0,068	-0,057	-0,064
Nbre moyen d'arbres interceptés	22,7	11,5	5,5	2,9	4,0
FST moyen	1	2	4	7,4	5,6

(* = significatif au seuil = 0,05 ; ** = significatif au seuil = 0,01 ; *** = significatif au seuil = 0,001). FST = facteur de surface terrière ; N = nombre de compétiteurs.

(1988) (**Tableau 2**). L'indice CS de Faber (1991) présente aussi des corrélations significatives avec les résidus du modèle général. Il faut toutefois remarquer que toutes ces corrélations, bien que significatives, restent relativement faibles (coefficient de corrélation de l'ordre de 0,15).

L'introduction des indices de compétition dans le modèle ne semble donc pas justifiée, d'autant plus que le faible gain qu'elle pourrait amener ne compense pas la complexité de l'application sur le terrain d'un modèle de croissance dépendant des distances.

4.4. Utilité des variables qualitatives stationnelles pour l'amélioration du modèle de croissance

Les analyses de la variance à un critère de classification effectuées sur les résidus moyens calculés pour chaque peuplement n'ont pas permis de mettre en évidence de facteur stationnel (pédologique, géomorphologique ou écologique) influençant significativement (au seuil = 0,05) la croissance en grosseur des mélèzes. Il faut toutefois souligner que certaines conditions de station sont peu représentées

au sein de l'échantillon, ce qui pourrait expliquer la difficulté d'isoler l'une ou l'autre variable explicative permettant d'affiner le modèle. En outre, l'indice de productivité global de la station (H50) est déjà pris en compte dans le modèle comme variable explicative.

5. EXEMPLE D'APPLICATION

Le modèle de croissance en grosseur déterminé peut être utilisé pour estimer l'évolution de peuplements de mélèze croissant en basse altitude en Europe occidentale. Ce modèle est mis en œuvre dans le logiciel MGC_larch "Make good choice for Larch" (Pauwels, 2003) qui permet de simuler différents itinéraires sylvicoles et d'évaluer leur impact sur la croissance des peuplements. À titre d'exemple, le **tableau 12** correspond à la table de production qui décrit l'évolution d'un peuplement de mélèze du Japon de classe de productivité moyenne (H50 : Hauteur dominante atteinte à 50 ans = 28 m), planté à 2000 tiges/ha et soumis à des éclaircies qui permettent aux arbres dominants (les 100 plus gros par hectare) de présenter un accroissement annuel moyen en

Tableau 12. Table de production pour un peuplement de mélèze du Japon de productivité moyenne (H50 = 28 m) et planté à 2000 plants/ha décrivant l'itinéraire sylvicole permettant aux arbres dominants de présenter un accroissement moyen en circonférence de 2,5 cm/an (résultats tirés du logiciel MGC_larch (Pauwels, 2003)) — *Yield table for a Japanese larch stand of middle site index (H50 = 28 m) and with initial stand density of 2000 trees/ha describing a silvicultural scenario enabling dominant trees to have 2.5 cm/year annual mean increment (MGC_larch software results (Pauwels, 2003)).*

Âge	Hdom	type	poids	Avant					Éclaircie				Après					Accroissements				PTV
				Nha	Gha	cg	Cdom	Vha	Nha	Gha	cg	Vha	Nha	Gha	cg	Cdom	Vha	ACV	ACG	AMV	Cdom	
12	8,8		0	1796	22,9	40	57	85,6	0	0	0	1796	22,9	40	57	85,6	0	0	7,2	3,2	86	
16	11,9	84	15	1796	35,6	50	70	191,3	269	3,8	42	19	1527	31,8	51	70	172,3	26,4	3,2	11,9	3,2	191
20	14,7	94	45	1527	41,7	59	80	282,7	687	16,7	55	111,9	840	24,9	61	78	170,8	27,6	2,5	15,1	2,5	302
24	17,2	93	95	840	31,9	69	88	258,5	294	9,8	65	79,1	546	22,1	71	87	179,4	21,9	1,8	16,2	2,5	389
28	19,4	93	30	546	27,6	80	97	249,5	164	7,3	75	66,1	382	20,3	82	95	183,4	17,5	1,4	16,4	2,5	460
32	21,4	102	19,9	382	24,9	91	105	253,4	76	5,1	92	52,2	306	19,8	90	102	201,2	17,5	1,2	16,6	2,5	530
36	23,2	101	19,9	306	23,8	99	112	263,3	61	4,9	100	54,1	245	19	99	110	209,2	15,5	1	16,4	2,4	592
40	24,8	92	20	245	22,6	108	120	268,6	49	3,9	100	45,3	196	18,8	110	119	223,2	14,9	0,9	16,3	2,5	651
44	26,2	93	14,8	196	22,1	119	129	274,9	29	2,9	112	35,6	167	19,2	120	128	239,4	12,9	0,8	16	2,5	703
48	27,4	94	15	167	22,4	130	138	293,5	25	3	123	39,6	142	19,4	131	137	254	13,5	0,8	15,8	2,5	757
52	28,5		100	142	22,3	141	147	303,4										12,3	0,7	15,5	2,5	806

Hdom = hauteur dominante — *dominant height* (m); type = type de l'éclaircie (circonférence moyenne des arbres éclaircis/circonférence moyenne du peuplement avant éclaircie) — *type of thinning (thinned trees mean girth/stand mean girth before thinning)*; poids = poids de l'éclaircie (nombre d'arbres éclaircis/nombre d'arbres avant éclaircie) — *weight of thinning (number of thinned trees/number of trees before thinning)*; Nha = nombre de tiges par ha — *number of trees per hectare*; Gha = surface terrière du peuplement ($m^2 \cdot ha^{-1}$) — *stand basal area (m^2/ha)*; cg = circonférence de l'arbre de surface terrière moyenne — *mean basal area tree girth (cm)*; Cdom = circonférence dominante — *dominant girth (cm)*; Vha = volume du peuplement — *stand volume (m^3/ha)*; ACV = accroissement courant en volume — *volume current increment ($m^3/ha/an$)*; ACG = accroissement courant en surface terrière — *basal area current increment ($m^2/ha/an$)*; AMV = accroissement moyen en volume — *volume mean increment ($m^3/ha/an$)*; PTV = production totale en volume — *total volume production (m^3/ha)*.

circonférence de 2,5 cm/an. Les caractéristiques des éclaircies sont déterminées par le logiciel en fonction des paramètres définis par l'utilisateur.

6. CONCLUSION

Un modèle de croissance individuelle en circonférence a été construit pour les mélèzes en Région wallonne. Il s'agit d'un modèle général, valable pour toutes les espèces de mélèze, qui fait intervenir des variables dendrométriques aussi générales que : la surface terrière, la hauteur dominante et l'âge du peuplement, l'indice de productivité de la station et la circonférence de l'arbre. Ce modèle a été validé sur un jeu de données indépendant de celui ayant servi à construire le modèle. L'erreur moyenne absolue de l'estimation est de 0,46 cm·an⁻¹ (soit 40 %). Ce modèle peut être utilisé dans les limites de variation des variables ayant servi à le construire. Cependant, pour des surfaces terrières inférieures à celles couvertes par les données de base ($G_{ha} < 12 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$), un facteur correctif, dépendant de la surface terrière, peut être utilisé. L'application de ce facteur correctif ne modifie pas significativement l'estimation de l'accroissement lorsque la surface terrière est proche de celle des peuplements ayant servi à construire le modèle.

Le modèle général n'est amélioré ni par l'introduction des indices de compétition ni par celle des quelques variables qualitatives retenues pour caractériser le milieu de croissance.

Ce modèle permet de décrire l'évolution de la grosseur des arbres soumis à différents types d'interventions.

Remerciements

Cette recherche a été financée par l'Union européenne dans le cadre du projet "Towards a European larch wood chain" (FAIR-CT98-3354) et a bénéficié, pour la collecte des données, de l'appui de la Région wallonne. Les données utilisées ont été récoltées, pour la Région wallonne, par l'équipe de la Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux (Unité de Gestion et Économie forestières) et, pour la France, par les équipes du CEMAGREF de Clermont-Ferrand et de l'INRA d'Orléans. Nous tenons à remercier toutes ces personnes qui nous ont fourni une information de qualité.

Bibliographie

Alemdag IS. (1978). *Evaluation of some competition indexes for prediction of diameter increment in planted white spruce. Information Report FMR-X-108*. Ottawa, Ontario, Canada: Forest Management Institute, 39 p.

Bouchon J. (1995). Concepts et caractéristiques des divers modèles de croissance. *Rev. For. Fr.* **47**, p. 23–34.

Danjon F. (1995). L'amélioration génétique et ses

conséquences sur les modèles de croissance. *Rev. For. Fr.* **47**, p. 192–202.

- Debouche C. (1977). *Application de la régression non linéaire à l'étude et à la comparaison de courbes de croissance longitudinale*. Thèse de doctorat. Fac. univ. Sci. agron. Gembloux (Belgique), 304 p.
- Faber PJ. (1991). A distance-dependant model of tree growth. *Forest Ecol. Manage.* **41**, p. 111–123.
- Hamilton GJ. (1969). The dependance of volume increment of individual trees on dominance, crown dimensions and competition. *Forestry* **42**, p. 133–144.
- Hasenauer H., Monserud RA. (1996). A crown ratio model for Austrian forests. *Forest Ecol. Manage.* **84**, p. 49–60.
- Hegyfi F. (1974). A simulation model for managing jack-pine stands. In Fries J. *Growth models for tree and stand simulation*. Stockholm: Royal College of Forestry, p. 74–90.
- Krajicek J., Brinkman K., Gingrich S. (1961). Crown competition - a measure of density. *Forest Sci.* **7**, p. 35–42.
- Lecomte H., Florin P., Thirion M. (1997). *L'inventaire des massifs forestiers de la Wallonie : Aperçu global de la situation en 1996*. Namur, Belgique : Ministère de la Région wallonne. Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Fiche technique 9, 43 p.
- Le Goff N. (1982). Productivité du frêne en région Nord-Picardie : courbes de croissance en hauteur. *Ann. Sci. For.* **39**, p. 259–288.
- Lejeune P. (1994). *Modélisation de la croissance et du développement de peuplements forestiers d'âges multiples : application à la hêtraie wallonne*. Thèse de doctorat. Fac. univ. Sci. agron. Gembloux, 210 p.
- Martin GL., Ek AR., Monserud RA. (1977). Control of plot edge bias in forest stand growth simulation models. *Can. J. For.* **7**, p. 100–105.
- Nystrom K., Gemmel P. (1988). Models for predicting height and diameter of individual trees in young *Picea abies* (L.) Karst. stands. *Scand. J. Forest Res.* **3**, p. 213–228.
- Pauwels D. (2003). *Conception d'un système d'aide à la décision pour le choix d'un scénario sylvicole : application aux peuplements de mélèze en Région wallonne*. Thèse de doctorat. Fac. univ. Sci. agron. Gembloux (Belgique), 236 p.
- Pauwels D., Thibaut A., Lejeune P., Rondeux J. (1999). Élaboration de courbes de croissance en hauteur dominante pour les mélèzes (*Larix decidua* Mill. et *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.) en Belgique méridionale. *Ann. Sci. For.* **56**, p. 27–34.
- Rondeux J. (1999). *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*. 2^e ed. Gembloux, Belgique : Les Presses agronomiques, 521 p.
- Wykoff WR. (1990). A basal area increment model for individual conifers in the northern rocky mountains. *Forest Sci.* **36**, p. 1077–1104.

(18 réf.)