

# Développement de modèles prédictifs des proportions de duramen et d'écorce des espèces de mélèze cultivées en zones de basse altitude en Europe de l'Ouest (*Larix kaempferi* (Lambert) Carr., *Larix decidua* Miller et *Larix eurolepis* Henry)

Dominique Pauwels<sup>a\*</sup>, Philippe Lejeune<sup>a</sup>, Luc E. Pâques<sup>b</sup> et Jacques Rondeux<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Faculté universitaire des Sciences Agronomiques, Unité de Gestion et Économie forestières, Passage des Déportés 2, 5030 Gembloux, Belgique  
<sup>b</sup> INRA, Unité d'Amélioration, de Génétique et de Physiologie des Arbres Forestiers, Centre d'Orléans, 45160 Ardon, France

(Reçu le 23 novembre 2001 ; accepté le 1<sup>er</sup> août 2002)

**Résumé** – Des modèles prédictifs de la proportion de duramen et d'écorce à 1,3 m de hauteur ont été développés pour les peuplements de mélèze du Japon (*Larix kaempferi* (Lambert) Carr.) plantés en Région wallonne (Belgique). Ces modèles sont testés pour évaluer dans quelle mesure ils peuvent être appliqués aux mélèzes d'Europe (*Larix decidua* Miller) et aux mélèzes hybrides (*Larix eurolepis* Henry) plantés dans les régions de basse altitude de l'Europe de l'Ouest. Pour la proportion de duramen, les variables explicatives retenues sont l'âge du peuplement et le diamètre à 1,3 m. Le modèle présente un coefficient de détermination de 0,859 pour le mélèze du Japon. En moyenne, le mélèze d'Europe présente des proportions de duramen plus faibles. En ce qui concerne la proportion d'écorce, la variable explicative retenue est le diamètre à 1,3 m. La variabilité résiduelle de ce modèle est beaucoup plus importante ( $R^2$  de 0,456). Le mélèze d'Europe présente en moyenne des proportions d'écorce plus importantes tandis que celles du mélèze hybride sont plus faibles. Un exemple d'utilisation de ces modèles en combinaison avec un modèle de croissance est présenté. Il permet d'évaluer l'influence d'une sylviculture dynamique sur les proportions de duramen et, dans une moindre mesure, d'écorce.

*Larix* / duramen / écorce / modèle prédictif

**Abstract** – Development of predictive models for heartwood and bark proportions for larch species planted in western European lowlands. Predictive models for heartwood and bark proportions have been developed for Japanese larch (*Larix kaempferi* (Lambert) Carr.) planted in South of Belgium. These models have been tested to evaluate the way of applying them to European larch (*Larix decidua* Miller) and hybrid larch (*Larix eurolepis* Henry) growing in west-European lowlands. For the heartwood proportion, independent variables selected are stand age and dbh. The model set up for Japanese larch has a  $R$ -square of 0.859. In average, European larch has lower heartwood proportion. With reference to bark proportion, selected independent variable is dbh. Residual variability is far more important for bark models ( $R$ -square of 0.456). European larch has, in average, higher bark proportion whereas hybrid larch has lower. An example of the application of these models in connection with a growth model is presented. It consists in an evaluation of the impact of dynamic silviculture on heartwood and bark proportion.

*Larix* / heartwood / bark / predictive model

## 1. INTRODUCTION

Les proportions respectives d'aubier et de duramen peuvent constituer un critère particulièrement important dans l'appréciation de la qualité d'une production ligneuse dans le cas d'essences à duramen coloré et destinées à des usages hautement valorisants, pour lesquels l'aubier est souvent considéré comme un résidu, au même titre que l'écorce.

Lors de l'élaboration de scénarios sylvicoles pour une essence donnée, il peut s'avérer utile d'évaluer leur impact sur la qualité des bois produits et notamment sur les proportions attendues d'aubier, de duramen, voire d'écorce, des arbres constituant le peuplement final.

Le développement de modèles de prédiction de variables qualitatives de ce type constitue un complément très utile aux modèles de croissance qui se limitent habituellement à prédire

\* Correspondance et tirés à part  
Tél. : (32) 81 62 22 28 ; fax : (32) 81 62 23 01 ; e-mail : gestecofor@fsagx.ac.be

l'évolution de variables dendrométriques générales du peuplement telles que le diamètre moyen, la surface terrière, le volume par hectare ou encore la hauteur dominante.

Deux espèces de mélèze sont cultivées en Europe occidentale. Il s'agit du mélèze du Japon (*Larix kaempferi* (Lambert) Carr.) et du mélèze d'Europe (*Larix decidua* Miller). Des variétés hybrides issues du croisement de ces deux espèces ont fait leur apparition et sont actuellement considérées comme une espèce à part entière (*Larix eurolepis* Henry).

Bien que les trois espèces de mélèze ne représentent qu'une faible proportion des surfaces forestières d'Europe occidentale (3 % en Allemagne de l'Ouest, 2 % en Belgique, 0,8 % en France, 6 % en Grande Bretagne, 1,7 % en Irlande...), leur potentiel de croissance en fait une des essences d'avenir pour la forêt de production de ces pays [25].

Moins connus que l'épicéa commun ou que le douglas, les mélèzes nécessitent cependant de recevoir un traitement sylvicole spécifique qui leur permette d'exprimer pleinement leurs potentialités, tout en garantissant une qualité acceptable des bois produits.

L'objectif de cette étude est de déterminer dans quelle mesure il est possible de développer à partir d'équations appropriées, un modèle prédictif des proportions d'écorce, d'aubier et de duramen pour les trois espèces de mélèze : le mélèze du Japon (MJ), le mélèze d'Europe (ME) et le mélèze hybride (MH). Il est important que ces équations puissent être intégrées au modèle de croissance de type « arbre indépendant des distances » déjà développé pour ces mêmes espèces [26]. Ce modèle permet d'estimer à chaque rotation et en fonction des éclaircies pratiquées, la circonférence des arbres constitutifs du peuplement. Couplé à d'autres modèles, il permet de retracer l'évolution des principales caractéristiques du peuplement (hauteur dominante, âge, surface terrière, nombre de tiges, volume et leur distribution par catégorie de grosseur).

## 2. MODÈLES DE PRÉDICTION DES PROPORTIONS D'AUBIER, DE DURAMEN ET D'ÉCORCE : BREF ÉTAT DES LIEUX

De nombreux auteurs ont étudié, dans le cas d'espèces résineuses, la relation entre la surface d'aubier à un niveau donné de l'arbre (généralement à hauteur de poitrine) et la surface foliaire de l'arbre [1, 5, 8, 10, 14, 17]. Ces études viennent généralement en appui à l'élaboration de modèles écophysiologiques des arbres et des peuplements.

D'autres chercheurs, privilégiant une approche différente, ont tenté de mettre en évidence des relations entre la quantité de duramen (ou d'aubier) et certaines caractéristiques de l'arbre ou du peuplement. Les variables les plus souvent citées dans ces études sont le diamètre à hauteur de poitrine [27], l'âge [7, 15] ; les deux étant parfois aussi associées [3], la surface de la section sous écorce [4], la vitesse de croissance [12, 28] ou encore la densité du peuplement [11, 22, 33].

Des études tentant de lier la proportion de duramen ou d'aubier à la sylviculture et notamment à l'intensité des éclaircies [19, 20], ont donné lieu à des résultats peu significatifs. Bjorklund [2] conclut à l'impossibilité d'utiliser les données d'inventaires forestiers, qu'il s'agisse des caractéristiques de

la station, du peuplement ou des arbres, pour identifier des tiges ou des peuplements de pin sylvestre « riches » en duramen. Cette conclusion résulte de la grande variabilité des proportions de duramen observée entre les individus d'une même station. Takei [30] présente toutefois, pour le mélèze du Japon, un abaque permettant de déterminer la proportion de duramen en fonction de la hauteur dominante et de la densité du peuplement.

Concernant l'estimation de la proportion ou de l'épaisseur de l'écorce, les modèles se basent essentiellement sur la grosseur de l'arbre [4, 9, 13, 31].

## 3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 3.1. Matériel

Les arbres échantillonnés ( $n = 382$ ) sont issus de peuplements ayant des provenances génétiques différentes (connues ou non) et installés dans différents pays d'Europe, principalement dans le sud de la Belgique (figure 1).

Le tableau I synthétise les informations relatives à ces différents sites.

Le matériel provenant d'études différentes, les prélèvements sur les arbres échantillonnés ont concerné dans certains cas (195 arbres) une rondelle à 1,3 m et dans les autres cas (187 arbres) deux rondelles, une à chaque extrémité d'un billon de 2 m prélevé à la base de l'arbre. Les mesures d'épaisseur d'écorce et de duramen ont été réalisées sur chaque rondelle, le long de 2 à 4 rayons. Des valeurs moyennes quadratiques ont ensuite été calculées par rondelle.

Les proportions d'écorce et de duramen sont exprimées par rapport à la surface terrière sur écorce calculée au niveau considéré. Dans la suite de l'étude, les proportions utilisées concernent le niveau de 1,3 m. Dans le cas des échantillons pour lesquels les rondelles ont été prélevées aux niveaux 0 et 2 m, les proportions à 1,3 m sont déterminées par interpolation linéaire entre les valeurs estimées aux deux niveaux.

Pour chaque arbre, les informations suivantes sont également disponibles : diamètre à 1,3 m, hauteur totale et âge.

La hauteur de la base de la cime vivante est également connue pour 362 bois. Pour 348 arbres, les caractéristiques du peuplement au moment de l'abattage (surface terrière, nombre de tiges, diamètre moyen, hauteur dominante) ont été estimées au sein d'une placette circulaire d'une surface variant entre 2 et 10 ares (comportant environ 20 tiges).

Le tableau II présente les principales caractéristiques de l'échantillon au plan des variables mesurées sur les arbres. Les caractéristiques des mélèzes d'Europe présentent de faibles coefficients de variation car les arbres proviennent en majorité (85 %) de tests IUFRO de provenances installés il y a environ 40 ans. Il en est de même pour le mélèze hybride, mais dans une moindre proportion (57 %). Les âges des mélèzes du Japon varient de 12 à 88 ans et couvrent les différentes classes d'âge comprises entre ces deux valeurs. La formation de duramen commence en effet très tôt chez les mélèzes, vers l'âge de 5 ans [16].

### 3.2. Méthodes

Étant donné les caractéristiques de l'échantillon, les modèles de prédiction des proportions de duramen et d'écorce sont déterminés pour les mélèzes du Japon. Ces modèles sont ensuite testés sur les mélèzes d'Europe et hybrides pour évaluer dans quelle mesure ils peuvent être appliqués à ces espèces.

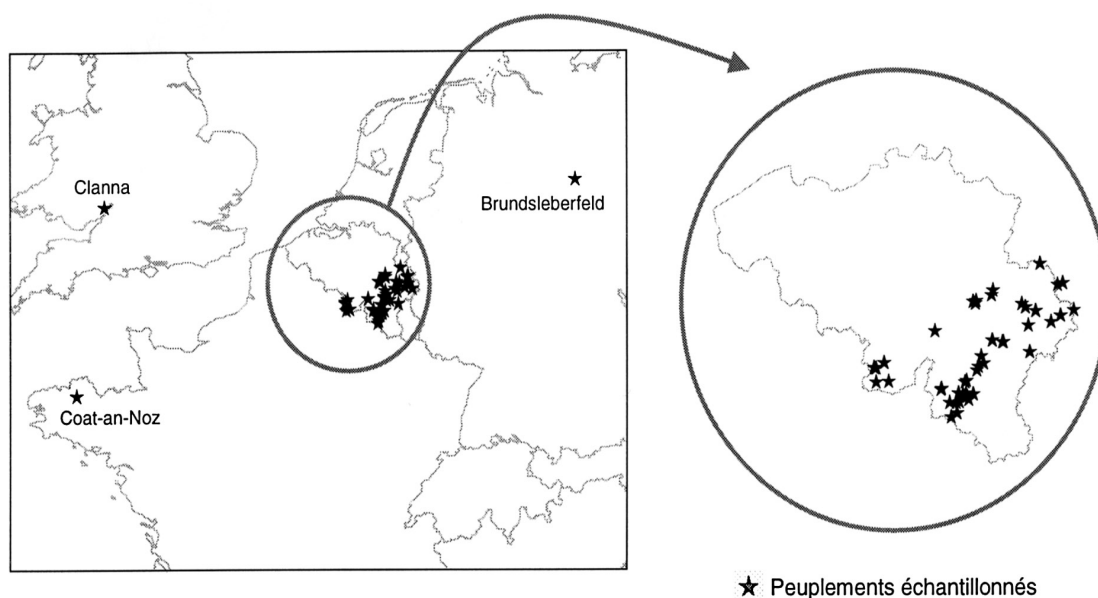


Figure 1. Localisation géographique des peuplements échantillonnés.

Tableau I. Distribution des arbres échantillons par site, par essence et par provenance.

Espèces	Pays Site	Belgique		Angleterre	France	Allemagne
		48 sites en Wallonie	Nassogne Test IUFRO	Clanna Test IUFRO	Coat-an-Noz Test IUFRO	Brundsleberfeld Test IUFRO
Japon		129 (inconnu)	–	–	–	–
Europe		24 (inconnu)	14 (Langau)	–	16 (Montgenèvre)	19 (Ruda)
Orig. alpine : Langau–Montgenèvre			17 (Ruda)		17 (Ruda)	15 (Blyzin)
Orig. centro-européenne : Ruda-Zabreh-Blyzin			18 (Zabreh)		15 (Zabreh)	
Hybride		42 (inconnu)	–	34 (croisements contrôlés)	22 (croisement contrôlé pleins-frères)	–
Nombre d'arbres		195	49	34	70	34
Altitude (m)		125–625	320	90	200	205

L'importance du duramen et de l'écorce aurait pu être évaluée par d'autres variables que leur proportion telles que leur rayon ou encore, pour le duramen, le nombre de cernes. Différents modèles ont été testés faisant intervenir ces variables. Seuls les modèles présentant les meilleurs ajustements et concernant les proportions de duramen et d'écorce sont présentés dans cet article. Ces modèles présentent, en outre, l'avantage, pour l'estimation de la proportion de duramen, de pouvoir s'affranchir de la connaissance de la largeur de chaque cerne, données nécessaires à la prédiction de l'importance du duramen lorsque le nombre de cernes duramenisés est choisi comme variable à prédire par le modèle. Il convient de rappeler que l'objectif de ce modèle est de prédire et non de décrire ou d'expliquer un phénomène car dans ce cas, le choix du nombre de cernes duramenisés comme variable à prédire aurait certainement été plus judicieux.

La détermination des modèles pour le mélèze du Japon se base sur une analyse graphique préalable (figures 2 et 3), complétée par l'établissement d'une matrice des corrélations simples qui donne une idée du type et de l'intensité des relations entre les variables à prédire

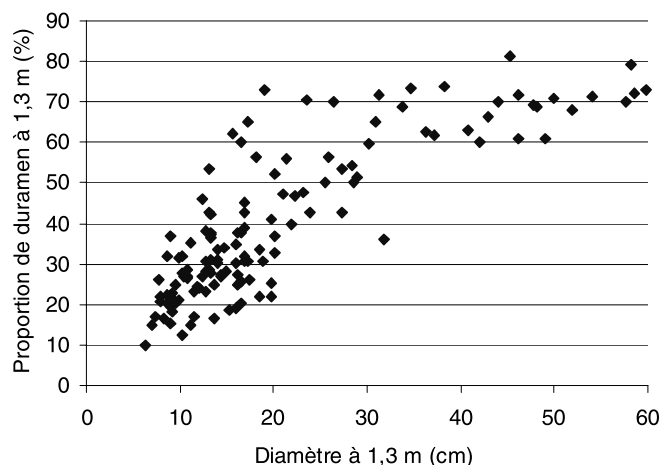
(proportion de duramen et proportion d'écorce) et les variables prédictives disponibles décrivant les arbres et les peuplements.

Une première série de modèles est établie pour estimer la proportion de duramen et la proportion d'écorce, en considérant uniquement les variables explicatives connues pour l'ensemble des arbres échantillons : il s'agit du diamètre à 1,3 m ( $d_{1,3}$ ), de la hauteur totale ( $h_{tot}$ ), de l'accroissement moyen en diamètre ( $acc_{d1,3}$ ) et de l'âge ( $A$ ). Sur base de l'analyse graphique des données, nous avons ajouté à la liste des régresseurs potentiels, des variables transformées, résultant de l'application aux variables de base, des fonctions  $x^{-1}$  et  $\ln(x)$ .

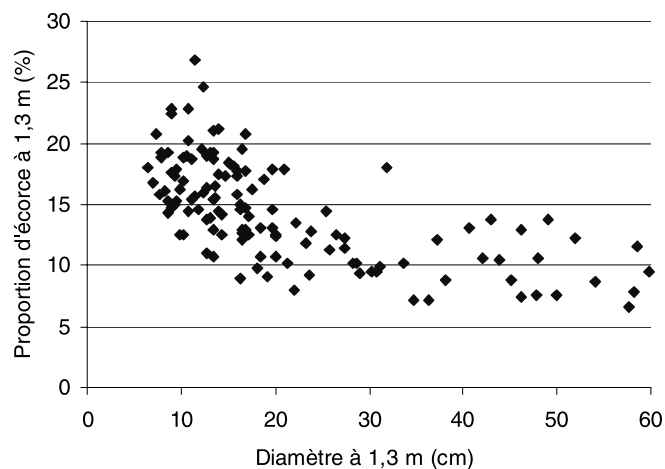
Les variables entrant dans le modèle sont sélectionnées en utilisant une procédure de sélection progressive des régresseurs (*stepwise*) en fixant à 2 les valeurs critiques relatives au test  $t$  d'entrée et de sortie des variables explicatives [21]. L'opportunité de garder toutes les variables sélectionnées par cette procédure a été appréciée à l'aide du facteur d'inflation de la variance (*variation inflation factor* – *VIF*) calculé pour chaque régresseur [29].

**Tableau II.** Caractérisation des variables mesurées sur les arbres échantillonnés : nombre d'observations ( $n$ ), valeur moyenne (moy), minimale et maximale (min, max), coefficient de variation (CV).

Variable	Caractéristique de l'échantillon	Espèce			
		MJ	ME	MH	Toutes
		$n$			
		129	155	98	382
Proportion de duramen (%)	moy. (min-max)	40,3 (10,2–81,4)	50,6 (7,6–67,4)	45,8 (8,5–72,9)	45,9 (7,6–81,4)
	CV %	46,4	19,2	40,8	35,4
Proportion d'écorce (%)	moy. (min-max)	14,5 (6,6–26,9)	16,5 (7,9–28,7)	12,1 (7,3–25,4)	14,7 (6,6–28,7)
	CV %	28,5	22,8	28,1	28,5
Diamètre à 1,3 m (cm)	moy. (min-max)	20,9 (6,4–59,8)	29,4 (8,3–48,0)	32,5 (5,7–68,0)	27,3 (5,7–68,0)
	CV %	63,5	24,0	58,8	51,1
Hauteur totale (m)	moy. (min-max)	17,0 (7,7–33,5)	22,7 (9,5–35,5)	20,1 (8,0–30,7)	20,1 (7,7–35,5)
	CV %	43,1	21,4	38,3	34,6
Âge (années)	moy. (min-max)	27,8 (12–88)	39,1 (16–61)	29,5 (11–42)	32,8 (11–88)
	CV %	71,1	20,1	44,7	46,0



**Figure 2.** Représentation des proportions de duramen à 1,3 m observées chez le mélèze du Japon en fonction du diamètre à 1,3 m.



**Figure 3.** Représentation des proportions d'écorce à 1,3 m observées chez le mélèze du Japon en fonction du diamètre à 1,3 m.

L'adéquation du modèle de prédiction est ensuite testée [23]. Pour chaque variable explicative, un test de courbure et un test d'interaction sont effectués en comparant l'équation de régression déterminée à deux équations, l'une étant ajustée aux données telles que  $x_i \leq \bar{x}$  et l'autre telles que  $x_i > \bar{x}$ . Un autre test permet également de comparer le modèle ajusté à l'ensemble des données au modèle ajusté aux données les plus centrales. Ces tests permettent d'identifier les variables responsables de l'inadéquation du modèle.

L'étude des résidus et des corrélations qu'ils présentent avec les variables explicatives qui ne sont pas disponibles pour tous les arbres de l'échantillon (surface terrière, diamètre moyen, nombre de tiges par hectare, hauteur dominante, site index (hauteur dominante atteinte à 50 ans), hauteur de la base de la cime, proportion de cime et statut social de l'arbre (diamètre de l'arbre/diamètre moyen du peuplement), permet d'évaluer les possibilités d'améliorer les modèles proposés à l'aide de ces variables supplémentaires. Ces variables n'ont pas été directement introduites dans le modèle car elles n'ont pas été mesurées pour tous les arbres de l'échantillon.

Étant donné la vérification de l'adéquation du modèle, la validation proprement dite s'est limitée à une recherche des observations influentes au travers de la distance de Cook [6].

Une fois les modèles déterminés pour le mélèze du Japon, ils sont appliqués aux mélèzes d'Europe et hybrides. Une étude des résidus et de leurs corrélations avec les variables explicatives permet d'évaluer dans quelle mesure les modèles déterminés pour le mélèze du Japon peuvent être utilisés pour les autres espèces.

L'ensemble de l'analyse statistique est réalisé à l'aide du logiciel MINITAB, version 13 [32].

## 4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 4.1. Proportion de duramen

Le modèle résultant de la procédure *stepwise* comporte trois variables explicatives. Il donne lieu à un coefficient de détermination  $R^2$  de 0,877 et à un écart-type résiduel de 6,55 % (tableau III). Les trois variables retenues sont, par ordre d'entrée dans le modèle : la hauteur totale, l'âge et le diamètre à 1,3 m, tous trois sous forme logarithmique ( $\ln(h_{tot})$ ,  $\ln(A)$ ,  $\ln(d_{1,3})$ ).

**Tableau III.** Coefficients et paramètres statistiques (facteur d'inflation de la variance (*VIF*), coefficient de détermination ( $R^2$ ) et écart-type résiduel (*S*)) des modèles de prédiction de la proportion de duramen ( $Du\%$ ): (a) modèle produit par la procédure *stepwise*, (b) modèle modifié (après suppression du régresseur  $\ln(h_{tot})$ ).

(a) Modèle « stepwise »			(b) Modèle « modifié »		
Termes	Coefficients de régression	VIF	Termes	Coefficients de régression	VIF
Constante	-68,034		Constante	-51,011	
$\ln(h_{tot})$	21,952	11,2	$\ln(A)$	19,513	3,1
$\ln(A)$	11,075	7,3	$\ln(d_{1,3})$	10,637	3,1
$\ln(d_{1,3})$	4,681	4,8			
$R^2 = 0,877$ ; $S = 6,55$ %			$R^2 = 0,859$ ; $S = 7,02$ %		
$h_{tot}$ : hauteur totale (m), $A$ : âge, $d_{1,3}$ : diamètre à 1,3 m (cm)					

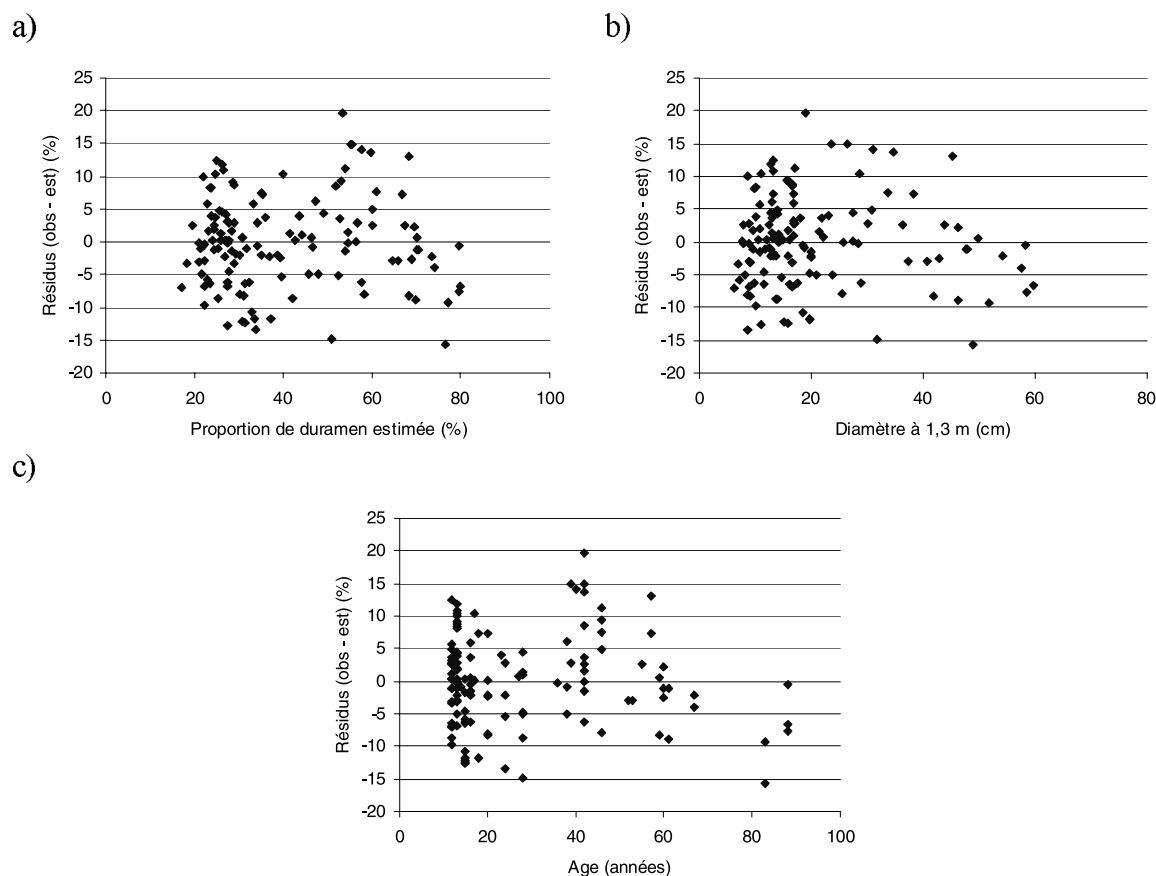
L'analyse du facteur *VIF* des régresseurs de cette équation met en évidence un problème de multicollinéarité entre  $\ln(h_{tot})$ , qui présente un facteur *VIF* de 11,2 et les autres variables présentes dans le modèle, si l'on admet que ce phénomène devient significatif pour des valeurs supérieures à 5 [29]. De plus, les tests d'adéquation du modèle montrent que celui-ci n'est pas adapté en raison d'une courbure possible due à la variable  $\ln(h_{tot})$ . Pour y remédier, un deuxième modèle a été

construit en empêchant les variables exprimant la hauteur totale d'être sélectionnées. Il ne comporte plus que deux variables explicatives ( $\ln(A)$  et  $\ln(d_{1,3})$ ) et présente un coefficient de détermination de 0,859 et un écart-type résiduel de 7,02 % (tableau III). Ce modèle ne présente plus d'inadéquation significative.

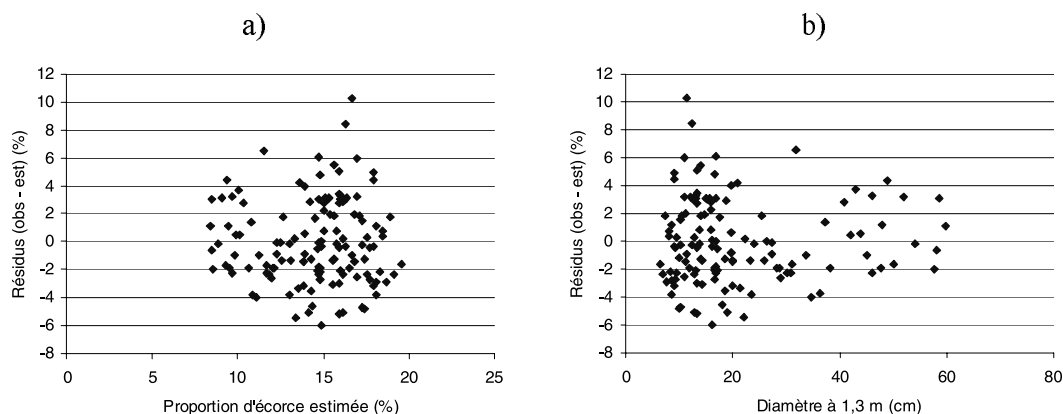
L'analyse graphique des résidus par rapport aux valeurs estimées et aux variables explicatives (figure 4) ne révèle aucune anomalie relative à la forme mathématique du modèle produit. Au plan de la sensibilité du modèle, aucun « point influent » n'est observé, les distances de Cook se révélant toutes inférieures à 1.

En ce qui concerne l'amélioration éventuelle du modèle, il apparaît que la proportion de cime permettrait d'augmenter de manière significative la qualité prédictive du modèle ( $r = -0,387$ ). Cependant, l'introduction de cette variable dans le modèle de prédiction destiné à être couplé à un modèle de croissance nécessite la détermination d'une relation décrivant l'évolution de la proportion de cime au cours du temps. L'imprécision liée à cette relation souvent peu nette peut annihiler l'intérêt de la prise en compte de la proportion de cime dans l'estimation de la proportion de duramen.

L'application du modèle aux mélèzes d'Europe montre que leurs proportions de duramen sont significativement plus faibles que celles des mélèzes du Japon. Une analyse de la



**Figure 4.** Résidus du modèle d'estimation de la proportion de duramen des mélèzes du Japon en fonction (a) de la proportion estimée, (b) du diamètre à 1,3 m, et (c) de l'âge.



**Figure 5.** Résidus du modèle d'estimation de la proportion d'écorce des mélèze du Japon en fonction (a) de la proportion estimée, et (b) du diamètre à 1,3 m.

variance réalisée sur les résidus en fonction du facteur « provenance » montre un effet significatif de ce dernier sur la proportion de duramen. Le facteur provenance explique 8,5 % de la variabilité des résidus. Les provenances « Langau » et « Montgenèvre » présentent toutes deux des proportions de duramen significativement plus faibles (résidus moyens de l'ordre de  $-9,75\%$ ). Les autres provenances affichent des résidus moyens variant de  $-5,2\%$  à  $-1,0\%$ . Ces résultats confirment les conclusions de Leibundgut [18] et Pâques [24] qui observent que les origines alpines produisent moins de duramen que les origines sudètes.

Une relation faisant intervenir les provenances sous la forme de variables binaires a donc été déterminée pour corriger le modèle de prédiction de la proportion de duramen :

$$\text{Résidus\_Du\%} = -3,8548 - 5,899 * \text{Langau} - 5,929 * \text{Montgenèvre.}$$

Cette relation traduit l'existence de proportions de duramen plus faibles pour les mélèzes d'Europe (en moyenne  $-3,85\%$ ) avec aggravation du déficit pour les provenances alpines. La combinaison de cette relation au modèle déterminé pour le mélèze du Japon permet une estimation non biaisée de la proportion de duramen des mélèzes d'Europe ( $R^2 = 0,471$ , Écart type résiduel =  $7,15\%$ ). Les résidus résultant de cette combinaison sont indépendants de la station sur laquelle les arbres ont été prélevés et ne sont corrélés à aucune variable explicative disponible pour tout ou une partie des arbres de l'échantillon.

Une démarche similaire a été envisagée pour évaluer la pertinence de l'utilisation du modèle pour estimer les proportions de duramen des mélèzes hybrides. Ceux-ci présentent des proportions de duramen significativement plus faibles. Il apparaît toutefois que seuls les résidus des arbres récoltés dans le dispositif de Coat-an-Noz sont significativement différents de 0 sans qu'il soit possible de déterminer s'il s'agit d'un effet de la station ou de la provenance. Une relation a donc été déterminée pour corriger le modèle de prédiction de la proportion de duramen :

$$\text{Résidus\_Du\%} = -3,282 * \text{Coat-an-Noz.}$$

L'absence de terme indépendant indique que les proportions de duramen des mélèzes du Japon et hybrides, autres que ceux de Coat-an-Noz, sont équivalentes. Le modèle d'estimation corrigé par cette relation permet une estimation non biaisée de la proportion de duramen des mélèzes hybrides ( $R^2 = 0,895$ , Écart type résiduel =  $6,08\%$ ). Les résidus ne sont corrélés à aucune variable explicative disponible pour tout ou une partie des arbres de l'échantillon.

#### 4.2. Proportion d'écorce

La proportion d'écorce pour le mélèze du Japon est prédite à l'aide du diamètre exprimé sous forme logarithmique ( $\ln(d_{1,3})$ ). Le coefficient de détermination de cet ajustement est de 0,456 et l'écart-type résiduel de  $3,04\%$ ,

$$\text{Ec\%} = 28,869 - 5,0067 * \ln(d_{1,3}).$$

Les tests effectués ne détectent aucune inadéquation significative du modèle.

Les analyses complémentaires réalisées sur ce modèle (distribution des résidus (figure 5), corrélation avec les variables explicatives supplémentaires, distances de Cook) ne remettent pas en cause sa validité.

L'application de ce modèle aux mélèzes d'Europe estime des proportions d'écorce significativement plus élevées. Une analyse de la variance des résidus permet de conclure à une influence significative du facteur « provenance ». Celui-ci permet d'expliquer environ 25 % de la variabilité observée. Les provenances « Zabreh », « Blyzin » et « Montgenèvre » sont caractérisées par des proportions d'écorce supérieures à la moyenne (résidus moyens respectivement de  $5,3\%$ ,  $5,7\%$  et  $9,4\%$ ). Les autres provenances présentent des résidus variant de  $2,0\%$  à  $3,5\%$ . La relation permettant de corriger le modèle de prédiction de la proportion d'écorce est déterminée :

$$\text{Résidus\_Ec\%} = 2,9815 + 2,2866 * \text{Zabreh} + 2,7082 * \text{Blyzin} + 6,4384 * \text{Montgenèvre.}$$

Les mélèzes d'Europe présentent des proportions d'écorce supérieures (en moyenne, environ  $3\%$ ). Cette relation couplée au modèle de prédiction permet une estimation non biaisée des

proportions d'écorce pour les mélèzes d'Europe ( $R^2 = 0,208$ , Écart type résiduel = 3,4 %). La variabilité non expliquée reste importante et les résidus sont significativement corrélés au diamètre à 1,3 m, ce qui tendrait à montrer qu'un modèle spécifique serait plus approprié pour l'estimation de la proportion d'écorce des mélèzes d'Europe.

L'utilisation du modèle pour la prédiction de la proportion d'écorce des mélèzes hybrides présente des résidus non significativement différents de zéro. L'analyse de la variance de ceux-ci met toutefois en évidence un effet du facteur « station ». Ce facteur permet d'expliquer environ 18 % de la variation observée. Une relation de correction du modèle d'estimation de la proportion d'écorce est donc définie :

$$\text{Résidus\_Ec\%} = -1,7477 + 2,562 * \text{Clanna} + 1,8334 * \text{Coat-an-Noz.}$$

Cette relation traduit l'observation de proportions d'écorce plus faibles pour les mélèzes hybrides. Cet avantage disparaît pour les mélèzes hybrides de Coat-an-Noz et s'inverse pour ceux de Clanna, sans qu'il soit possible de distinguer l'effet station de l'effet provenance. L'utilisation de cette relation de correction couplée au modèle de prédiction permet une estimation non biaisée de la proportion d'écorce ( $R^2 = 0,460$ , Écart type résiduel = 2,5 %). Les résidus ne sont significativement liés à aucune variable explicative disponible pour tout ou une partie des arbres de l'échantillon.

### 4.3. Discussion

Le modèle « duramen », pour les mélèzes du Japon, d'Europe et hybrides de Belgique peut, si on excepte les provenances alpines (d'ailleurs déconseillées sous ce climat), se résumer par l'équation :

$$\text{Du\%} = -51,011 + 10,637 * \ln(d_{1,3}) + 19,513 * \ln(A) - 3,8548 \text{ ME.}$$

La variable binaire « ME » permet de différencier les mélèzes d'Europe. Ceux-ci comportent, en moyenne, une proportion moindre de duramen. La différence par rapport aux deux autres espèces est de l'ordre de 4 %, toutes autres choses étant égales (diamètre et âge).

Le modèle permettant d'estimer la proportion d'écorce est exprimé par la relation :

$$\text{Ec\%} = 28,869 - 5,0067 * \ln(d_{1,3}) + 2,9815 * \text{ME} - 1,7474 * \text{MH.}$$

Le mélèze d'Europe présente des proportions d'écorce en moyenne supérieures (de l'ordre de 3 %) tandis que les mélèzes hybrides ont une écorce plus fine (-1,75 %). Ce modèle présente toutefois un niveau de précision nettement moindre que le modèle « duramen ». La variabilité non expliquée reste importante, particulièrement pour le mélèze européen ( $R^2 = 0,208$ ), pour lequel un modèle spécifique serait certainement plus approprié.

L'effet du facteur provenance a pu être mis en évidence pour le mélèze européen, à la fois pour la proportion de duramen (le facteur « provenance » explique 8,5 % de la variabilité résiduelle) et surtout pour la proportion d'écorce, pour laquelle 25 % de la variabilité résiduelle est expliquée par ce

même facteur. La provenance « Langau » se caractérise par des proportions de duramen inférieures à la moyenne des mélèzes d'Europe (-5,9 %), les provenances « Zabreh » et « Blyzin » par des proportions d'écorce supérieures (respectivement +2,3 % et +2,7 %). La provenance « Montgenèvre » quant à elle cumule un duramen moins important (-5,9 %) et une écorce plus épaisse (+6,4 %).

Un effet de la station a été identifié pour l'estimation des proportions d'écorce et de duramen des mélèzes hybrides sans qu'il soit possible de le distinguer de l'effet provenance. Pour cette espèce, il n'y a, en effet, pas de provenance identique sur des stations différentes.

Les modèles de prédiction doivent dès lors être utilisés avec précaution en dehors de la Belgique. Ils peuvent toutefois fournir une première approximation des proportions d'écorce et de duramen. Ils ne sont utilisables que dans les gammes d'âges (12 à 88 ans) et de diamètres (6 à 60 cm) pour lesquelles ils ont été construits. En dehors de cette plage, les résultats doivent être utilisés avec précaution.

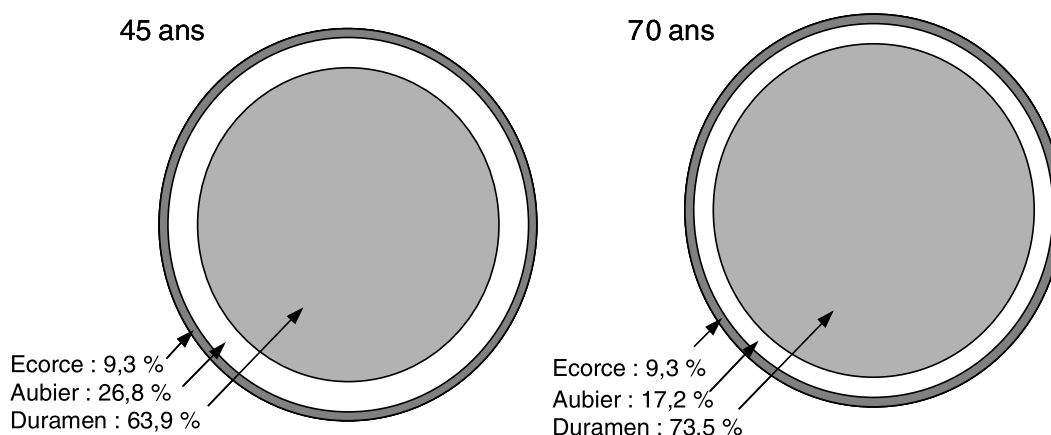
L'utilisation effective des modèles développés sort du cadre de la présente étude. Néanmoins, nous présentons, à titre d'exemple, l'estimation de la proportion d'écorce et de duramen des arbres moyens de deux peuplements résultant de pratiques sylvicoles fortement différentes. Pour ne pas compliquer l'exemple, seul le cas du mélèze du Japon est pris en considération. Les caractéristiques dendrométriques des arbres sont dérivées de l'utilisation du modèle de croissance évoqué en introduction [26]. Les arbres moyens issus des deux peuplements ont tous les deux un diamètre à 1,3 m de 50 cm. Ces arbres sont produits en 45 ans dans le cas de la sylviculture dynamique et en 70 ans dans le cas d'une sylviculture plus conservatrice. Les résultats sont présentés sous forme graphique à la *figure 6*. On constate que les arbres produits en appliquant un traitement plus intensif présentent des proportions moindres de duramen (63,9 % contre 73,5 %).

## 5. CONCLUSIONS

Des modèles prédictifs de la proportion de duramen et d'écorce ont été construits pour les mélèzes du Japon en Belgique puis testés pour évaluer leur applicabilité aux mélèzes d'Europe et hybrides cultivés en Europe occidentale. Ces modèles sont basés sur des variables descriptives des arbres sur pied faciles à mesurer et qui peuvent être dérivées de modèles de croissance courants. Il s'agit du diamètre à 1,3 m et de l'âge.

La prédiction de la proportion de duramen s'accommode d'un modèle unique pour les trois espèces. L'effet « espèce » y est traduit par l'utilisation d'une variable binaire différenciant le mélèze européen des deux autres espèces.

La prédiction de la proportion d'écorce pour les mélèzes du Japon et hybrides peut être envisagée au travers d'un modèle commun en introduisant une variable binaire représentant le mélèze hybride. Par contre, le mélèze d'Europe nécessiterait la détermination d'un modèle spécifique même après l'introduction d'une variable binaire permettant de le différencier. Les caractéristiques de l'échantillon concernant cette espèce de mélèze ne permet pas de définir un tel modèle.



**Figure 6.** Proportions estimées d'écorce, d'aubier et de duramen pour 2 mélèzes du Japon soumis à des sylvicultures différentes (diamètre de 50 cm atteint respectivement à 45 ans et 70 ans).

La précision du modèle « écorce » est de loin inférieure à celle du modèle « duramen » ( $R^2$  compris entre 0,208 et 0,460 contre  $R^2$  compris entre 0,474 et 0,895). Un effet « provenance » a été mis en évidence au niveau des résidus des modèles « écorce » et « duramen » dans le cas du mélèze d'Europe. Un effet « station » ou « provenance », sans qu'il soit possible de les distinguer, influence les résidus des modèles « écorce » et « duramen » pour les mélèzes hybrides.

Un exemple d'application des modèles « écorce » et « duramen » sur des données dérivées d'un modèle de croissance illustre les possibilités d'utilisation de ceux-ci. Cet exemple, qui concerne des arbres résultant de traitements sylvicoles très différents, montre que les arbres produits selon une sylviculture plus intensive présentent une proportion de duramen moindre.

La portée des modèles produits est limitée à une estimation globale des proportions d'écorce et de duramen à 1,3 m de hauteur. Ces équations permettent de prévoir globalement l'impact du rythme de croissance des arbres sur ces proportions. Cependant une connaissance de la répartition du duramen le long de la tige permettrait de répondre à d'autres questions, concernant notamment l'opportunité et l'impact des opérations d'élagage à grande hauteur. Une telle approche nécessiterait cependant de disposer de données plus détaillées imposant de recourir à un échantillonnage plus lourd quant aux mesures à réaliser sur les arbres échantillons.

**Remerciements:** Cette étude a été réalisée dans le cadre du contrat européen FAIR-CT98-3354 « Towards a European larch wood chain ». Les données utilisées proviennent de mesures réalisées sur du matériel expérimental récolté par différentes équipes et institutions de recherche que nous tenons à remercier :

- BOKU, University of Agricultural Sciences de Vienne (A) ;
- Faculté universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux (B) ;
- Forestry Commission, Northern Research Station (UK) ;
- INRA d'Orléans (F) ;
- Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt de Staufenberg-Escherode (D) ;
- Centre de Recherches de la Nature, de la Forêt et du Bois (B).

## RÉFÉRENCES

- [1] Bartelink H.H., Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas-fir, *For. Ecol. Manage.* 86 (1996) 193–203.
- [2] Bjorklund L., Identifying heartwood-rich stands or stems of *Pinus sylvestris* by using inventory data, *Silva Fenn.* 33 (1999) 119–129.
- [3] Climent J., Gil L., Pardos J., Heartwood and sapwood development and its relationship to growth and environment in *Pinus canariensis* Chr. Sm ex DC, *For. Ecol. Manage.* 59 (1993) 165–174.
- [4] Courbet F., Houiller F., Modelling the profile and internal structure of tree stem. Application to *Cedrus atlantica* (Manetti), *Ann. For. Sci.* 59 (2002) 63–80.
- [5] Coyea M.R., Margolis H.A., Factors affecting the relationship between sapwood area and leaf area of balsam fir, *Can. J. For. Res.* 22 (1992) 1684–1693.
- [6] Dagnelie P., Statistique théorique et appliquée. Tome 2. Inférence statistique à une et à deux dimensions, De Boeck, Bruxelles, 1998.
- [7] De Kort I., Relationships between sapwood amount, latewood percentage, moisture content and crown vitality of Douglas fir, *Pseudotsuga menziesii*, *IAWA J.* 14 (1993) 413–427.
- [8] Dean T.J., Long J.N., Variation in sapwood area – leaf area ratios within two stands of lodgepole pine, *For. Sci.* 32 (1986) 749–758.
- [9] Eerikäinen K., Stem volume models with random coefficients for *Pinus kesiya* in Tanzania, Zambia and Zimbabwe, *Can. J. For. Res.* 31 (2001) 879–888.
- [10] Espinosa Bancalari M.A., Perry D.A., Marshall J.D., Leaf area-sapwood area relationships in adjacent young douglas fir stands with different early growth rates, *Can. J. For. Res.* 17 (1987) 174–180.
- [11] Fries A., Heartwood and sapwood variation in mature provenance trials of *Pinus sylvestris*, *Silvae Genet.* 48 (1999) 7–14.
- [12] Gilbert J.-M., Chevalier R., Influence de l'âge et de la vitesse de croissance sur le cœur rouge du Pin laricio, *Ingénieries EAT* 4 (1995) 23–31.
- [13] Gordon A., Estimating bark thickness of *Pinus radiata*, *N.Z.J. For. Sci.* 13 (1983) 340–353.
- [14] Grier C.C., Waring R.H., Conifer foliage mass related to sapwood area, *For. Sci.* 7 (1974) 205–206.
- [15] Hazenberg G., Yang K.C., The relationship of tree age with sapwood and heartwood width in black spruce, *Picea mariana* (Mill.) B.S.P., *Holzforsch.* 45 (1991) 317–320.
- [16] Hirai S., The early stage of the transformation of sapwood of Japanese larch into heartwood, *Res. Bull. Coll. Exp. For. Hokkaido Univ.* 15 (1952) 239–253.



- [17] Long J.N., Smith F.W., Leaf area-sapwood area relations of lodgepole pine as influenced by stand density and site index, *Can. J. For. Res.* 18 (1988) 247–250.
- [18] Leibundgut H., Untersuchungen über europäische Lärchen, Schweiz. Z. Forstwes. 134 (1983) 61–62.
- [19] Mäkelä A., Virtanen K., Nikinmaa E., The effects of ring width, stem position, and stand density on the relationship between foliage biomass and sapwood area in Scots pine (*Pinus sylvestris*), *Can. J. For. Res.* 25 (1995) 970–977.
- [20] Mörling T., Valinger E., Effects of fertilization and thinning on heartwood area, sapwood area and growth in Scots pine, *Scand. J. For. Res.* 14 (1999) 462–469.
- [21] Myers R.H., Classical and modern regression with applications, BWS-KENT, Boston, 1990.
- [22] Ojansuu R., Maltamo M., Sapwood and heartwood taper in Scots pine stems, *Can. J. For. Res.* 25 (1995) 1928–1943.
- [23] Palm R., Iemma A.F., Conditions d'application et transformations de variables en régression linéaire, Notes de Statistique et d'Informatique No 1, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, 2002.
- [24] Pâques L.E., Genetic control of heartwood content in larch, *Silvae Genet.* 50 (2001) 69–75.
- [25] Pauwels D., Rondeux J., Le mélèze, une essence à haut potentiel de production, *Silva Belg.* 107 (2000) 6–10.
- [26] Rondeux J., Pauwels D., Lejeune P., Finalisation du modèle de croissance pour les mélèzes, Rapport final de Convention de recherche financée par la Région wallonne, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, 1999.
- [27] Sellin A., Sapwood-heartwood proportion related to tree diameter, age and growth rate in *Picea abies*, *Can. J. For. Res.* 24 (1994) 1022–1028.
- [28] Sellin A., Sapwood amount in *Picea abies* (L.) Karst. determined by tree age and radial growth rate, *Holzforsch.* 50 (1996) 291–296.
- [29] Snee R.D., Validation of regression models: methods and examples, *Technometrics* 19 (1977) 415–428.
- [30] Takei F., Development of tending techniques to control the heartwood formation of the stems of Japanese larch (*Larix leptolepis* Gord.), *J. Jpn. For. Soc.* 78 (1996) 347–353.
- [31] Vautherin P., Issartel M., Cubage des bois ronds : vers des taux d'écorce moyens ?, *CTBA info* 42 (1993) 2–5.
- [32] X., Minitab user's guide: data analysis and quality tools, release 13 for windows, PA Stat Collège, Minitab, 2000.
- [33] Yang K.C., Hazenberg G., Impact of spacings on sapwood and heartwood thickness in *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. and *Picea glauca* (Moench.) Voss, *Wood Fiber Sci.* 24 (1992) 330–336.